



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MERJA RANTALA
SULAKESUOJAUKSEN VAIHTOEHDOT AURINKOSÄHKÖJÄR-
JESTELMISSÄ
Diplomityö

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 9. touko-
kuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

RANTALA, MERJA: Sulakesuojauksen vaihtoehdot aurinkosähköjärjestelmissä

Diplomityö, 64 sivua, 5 liitesivua

Maaliskuu 2013

Pääaine: Teholähde-elektroniikka

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio

Avainsanat: Active Clamping, Aurinkovaihtosuuntaaja, aurinkosähköjärjestelmä, aurinkogeneraattori, elektroninen sulake, takavirta, vikavirtasuojaus

Aurinkosähkön merkitys energiantuotannossa on kasvanut viime vuosina merkittävästi. Pyrkimys vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä tulevaisuudessa kasvattaa sen suosiota entisestään. Tämä puolestaan tarkoittaa jakeluverkkoon kytkettävien aurinkosähköjärjestelmien määrän lisääntymistä, sekä järjestelmien tehon kasvamista. Järjestelmien muuttuessa teholtaan suuremmiksi tulee niiden käyttäjien ja asentajien turvallisuuteen, sekä laitteiston suojaamiseen kiinnittää entistä enemmän huomiota.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia vaihtoehtoja menetelmää nykyiselle PV-sulakkeilla ja sarjadiodeilla toteutettavalle vikavirtasuojaukselle. Aluksi tutkittiin aurinkosähköjärjestelmässä esiintyviä vikatilanteita, joissa vikavirtasuojasta tarvitaan. Aurinkogeneraattorin simulointimallin avulla tarkasteltiin osittaisen varjostumisen ja paneelien oikosulun vaikutusta takavirran muodostumiseen aurinkogeneraattorissa. Todettiin, että käytännössä vain paneeliketjun osittainen tai täydellinen oikosulku mahdollistaa takavirran kulkemisen generaattorissa. Lisäksi tarkasteltiin maavikavirran ja takavirran muodostumista sekä galvaanisesti erotetun että erottamattoman järjestelmän tapauksessa.

Työssä keskityttiin PV-sulakkeet ja sarjadiodit korvaavan järjestelmäkohtaisen elektronisen sulakkeen suunnitteluun pienjänniteverkkoon kytkettävään aurinkosähköjärjestelmään. Todettiin, että elektroninen sulake on toteutettavissa rinnakkais- ja sarjakytkimillä, joilla takavirran kulkeminen generaattorissa voidaan estää ja katkaista virtapiiri maavikavirran noustessa turvallisuuden kannalta liian korkeaksi. Elektronisen sulakepiirin toimintaa mallinnettiin lopuksi simulointimallin avulla.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

RANTALA, MERJA: Overcurrent Protection with an Electronic Fuse in Solar Power Systems

Master of Science Thesis, 64 pages, 5 Appendix pages

March 2013

Major: Switched Mode Converter Design

Examiner: Professor Teuvo Suntio

Keywords: Active Clamping, Electronic Fuse, Fault Current Protection, Reverse Current, Solar Generator, Solar Inverter, Solar Power System

The importance of the solar energy has increased during the recent years remarkably. The aim to reduce the use of fossil fuels in the future will presumably increase the popularity of the solar energy further. This means that the total amount and the size of the solar power systems connected to the utility grid will increase. The higher the power capacity, the more attention must be paid for the safety issues during the use and the maintenance of the systems.

The purpose of this Master of Science thesis was to find out the alternative for PV-fuses and string diodes in fault current protection in a solar power system. First the possible failure mechanisms and the effect of the partial shading on forming reverse current were studied and the simulation model of the solar generator was built. According to the simulations it was found out that partial or complete short circuit in a string is practically the only mechanism causing the reverse current to flow in the solar generator. Also the possible mechanisms causing the fault earth current both in galvanic isolated and galvanic non-isolated solar power systems were studied.

This work focused on replacing the fuses and the string diodes with a system integrated electronic fuse circuit in low-voltage grid-connected systems. It was approved that the electronic fuse can be implemented with a series switch that breaks the circuit when the fault earth current is measured and with a parallel switch that prevents the reverse current by short-circuiting the output of the solar generator. The behavior of the electronic fuse was validated with a simulation model.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty ABB Oy:n Solar Inverters-yksikössä osana aurinkovaihtosuuntaajien tuotekehitystä. Työn tarkastajana toimi professori Teuvo Suntio Tampereen teknillisen yliopiston sähköenergiatekniikan laitokselta ja ohjaajana tekniikan tohtori Joonas Puukko ABB Oy:stä.

Haluan kiittää Joonas Puukkoa ja Lari Nousiaista työhöni saamastani asiantuntijaavusta, sekä professori Teuvo Suntiota työni tarkastamisesta sekä mielenkiintoisista kursseista, jotka innostivat minua tehoelektroniikan pariin. Kaikkia ABB:lla tuntemaan oppimiani ihmisiä haluan kiittää hyvästä työilmapiiristä ja työkaveruudesta. Oma perhettäni haluan kiittää jaksamisesta niinäkin hetkinä, kun olen ollut paljon pois kotoa opintojen ja työn takia.

Valkeakoskella 5.4.2013

Merja Rantala

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Aurinkosähköjärjestelmä	2
2.1	Aurinkokenno ja aurinkopaneeli	2
2.2	Sähköenergian tuottaminen aurinkopaneeleilla	7
2.3	Aurinkovaihtosuuntaaja	8
2.3.1	Maksimitehopisteen seuranta	10
2.3.2	DC-DC-aste ja verkkovaihtosuuntaaja	11
3	Vikatilanteet aurinkosähköjärjestelmissä	13
3.1	Takavirta ja maasulkuvika	13
3.2	Asennusvirheet	17
3.3	Sääolosuhteiden vaikutus laitteiston vikaantumiseen	17
3.4	Kennomateriaalin vaikutus takavirtaan	18
3.5	Aurinkogeneraattorin simulointimalli	19
3.5.1	Simulointituloksia: Takavirran esiintyminen	22
3.6	Vikavirtasuojaus aurinkosähköjärjestelmissä	26
3.6.1	Sulakkeet ja sarjadiodit	27
4	Elektroninen sulake aurinkosähköjärjestelmässä	30
4.1	Elektronisen sulakkeen toteutustapoja	30
4.1.1	Galvaanisesti erotettu järjestelmä	32
4.1.2	Galvaanisesti erottamaton järjestelmä	33
4.2	Elektronisen sulakkeen toiminta eri vikatilanteissa	34
4.3	Elektronisen sulakkeen kytkimet	36
4.3.1	Kytkimien ohjaus ja clamping-piirit	37
4.4	Elektronisen sulakkeen simulointimalli	39
4.5	Simulointituloksia: Elektronisen sulakkeen toiminta	42
4.6	Elektroniseen sulakkeeseen liittyviä patenteja	47
5	Johtopäätökset ja yhteenveto	51
	Lähteet	53

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Termit

Aurinkogeneraattori	Aurinkopaneelien sarja- ja rinnankytkennän muodostama tasavirtalähde
Aurinkosähköjärjestelmä	Aurinkogeneraattorin, kaapeloinnin ja vaihtosuuntaajan muodostama järjestelmä, jolla auringon säteilyenergiaa muutetaan suoraan sähköenergiaksi
Aurinkovaihtosuuntaaja	Laite, jolla paneelien tuottama tasavirta vaihtosuunnataan jakeluverkkoon syötettäväksi vaihtovirraksi
Elektroninen sulake	Elektroniikkapiiri, joka estää vikavirtojen kulkemisen aurinkogeneraattorissa
Maasulku	Aurinkopaneelin tai -generaattorin käyttömaadoittamattoman osan tai käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan välinen eristysvika
Maavikavirta	Virta, joka kulkee järjestelmän jännitteisen osan ja maan välillä eristysvian takia
Maavuotovirta	Virta, joka kulkee järjestelmän jännitteisen osan ja maan välillä maakapasitanssin kautta, eikä edellytä laitevikaa
Takavirta	Aurinkogeneraattorissa normaalin toiminnan kannalta vastakkaiseen suuntaan kulkeva virta

Lyhenteet

CC	Constant Current, vakiovirta
CV	Constant Voltage, vakiojännite
MPP	Maximum Power Point, aurinkokennon, -paneelin tai -generaattorin maksimitehopiste
MPPT	Maximum Power Point Tracking, maksimitehopisteen seuranta
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature, aurinkokennon nimellinen toimintalämpötila, kun auringon säteilyintensiteetti on 800 W/m^2 , ympäristön lämpötila $20 \text{ }^\circ\text{C}$, tuulennopeus 1 m/s
STC	Standard Test Conditions, standarditestiolosuhteet, joissa aurinkopaneelien sähköisiä ominaisuuksia mitataan. Paneelin lämpötila $25 \text{ }^\circ\text{C}$, auringon säteilyintensiteetti 1000 W/m^2 ja ilmamassa (Air Mass) 1,5
THD	Total Harmonic Distortion, harmoninen särö

Symbolit

Δt	Ajan muutos [s]
ΔU_{OC}	Vikaantuneen generaattorin ja osittain oikosulussa olevan paneeliketjun avoimen piirin jännitteiden välinen ero
A	Paneelin ideaalisuuskerroin
C_{clamp}	Passive clamping -piirin kondensaattori
C_{mid}	DC-välipiirin kondensaattori
c_{pv}	Aurinkokennon, -paneelin tai -generaattorin sisäinen kapasitanssi
c_{st}	Aurinkokennon, -paneelin tai -generaattorin maaka- pasitanssi
D	Diodi
D_1	Rinnakkaiskytkimelle vastarinnankytketty diodi
D_2	Rinnakkaiskytkimen active clamping -piirin diodi
D_3	Sarjakytkimen active clamping -piirin diodi
D_Z	Zenerdiodi
D_{Z_K1}	Rinnakkaiskytkimen active clamping -piirin zenerdiodi
D_{Z_K2}	Sarjakytkimen active clamping -piirin zenerdiodi
E_L	Johdotuksen induktanssiin varastoitunut energia
G	Auringon säteilyintensiteetti [W/m^2]
G_{STC}	Auringon säteilyintensiteetti STC-olosuhteissa, $1000 W/m^2$
i_0	Paneelin vuotovirta PN-liitoksen läpi
i_{K1}	Rinnakkaiskytkimen virta
i_{K2}	Sarjakytkimen virta
I_L	Johtimen läpi kulkeva virta
I_{MIN}	Kaapelin vähimmäisvirrankesto
I_{MPP}	Aurinkokennon, -paneelin, tai -generaattorin maksimiteho- pisteen virta
i_{ph}	Häviöttömässä aurinkokennossa tai -paneelissa muodostuva virta
i_{pv}	Aurinkokennon, -paneelin, tai -generaattorin ulostulovirta
I_R	Takavirran maksimiarvo
I_{SC}	Aurinkokennon, -paneelin, tai -generaattorin oikosulkuvirta, maksimiulostulovirta
I_{SC_STC}	Paneelin oikosulkuvirta STC-olosuhteissa
I_{SC_GEN}	Generaattorin tuottama maksimivirta
I_Z	Zenervirta
I_{Z1}	Rinnakkaiskytkimen active clamping -piirin zenervirta
I_{Z2}	Sarjakytkimen active clamping -piirin zenervirta
k	Boltzmannin vakio, $1,3806488(13) \times 10^{-23} J/K$
K_I	Aurinkopaneelin virran lämpötilakerroin

K_U	Aurinkopaneelin jännitteen lämpötilakerroin
K_T	Paneelin lämpötilan nousukerroin tietyllä säteilyintensiteetille
L_{johdin}	Johtimen induktanssi
L_{K1}	Rinnakkaiskytkimen induktanssi
L_{K2}	Sarjakytkimen induktanssi
N	Rinnan kytkettyjen paneeliketjujen lukumäärä aurinkogeneraattorissa
N_P	Yhteen paneeliketjuun sarjaan kytkettyjen paneelien lukumäärä
N_S	Yhdessä paneelissa sarjaan kytkettyjen aurinkokennojen lukumäärä
P_{MPP}	Aurinkokennon, -paneelin tai -generaattorin maksimi ulostuloteho
P_{MPP_STC}	Paneelin ulostuloteho STC-olosuhteissa
q	Elektronin varaus, $1,6021773 \times 10^{-19}$ C
R_{g_K1}	Rinnakkaiskytkimen hilavastus
R_{g_K2}	Sarjakytkimen hilavastus
R_{johdin}	Johtimen resistanssi
r_S	Aurinkokennon parasiittinen sarjaresistanssi
r_{SH}	Aurinkokennon parasiittinen rinnakkaisresistanssi
T	Lämpötila [K]
T_{AMB}	Ympäristön lämpötila [K]
u_{DC}	Vaihtosuuntaajaan DC-jännite
U_{DC}	Piirin DC-jännite
U_L	Johtimen induktanssiin muodostunut jännite
U_{MPP}	Aurinkokennon tai paneelin maksimitehopisteen jännite
U_{MPP_GEN}	Aurinkogeneraattorin maksimitehopisteen jännite
U_{MPP_STC}	Paneelin ulostulojännite STC-olosuhteissa
U_{OC}	Aurinkokennon, -paneelin tai -generaattorin avoimen piirin jännite, maksimijännite
U_{OC_GEN}	Aurinkogeneraattorin avoimen piirin jännite
U_{OC_STC}	Paneelin avoimen piirin jännite STC-olosuhteissa
u_{pv}	Aurinkokennon, -paneelin tai -generaattorin ulostulojännite
U_T	Aurinkopaneelin terminen jännite
U_Z	Zenerjännite
V_{CE_K1}	Rinnakkaiskytkimen kollektori-emitteri -jännite
V_{CE_K2}	Sarjakytkimen kollektori-emitteri -jännite
V_{clamp}	Clamping-jännite, johon kytkimen yli oleva jännite rajoittuu kytkentähetkellä
V_{g_K1}	Rinnakkaiskytkimen hilajännite
V_{g_K2}	Sarjakytkimen hilajännite

1 JOHDANTO

Energiantuotannossa eletään murroskautta. Vanhoja, fossiilisten polttoaineiden käyttöön perustuvia energiantuotantomuotoja halutaan korvata uusilla kestävän kehityksen menetelmillä. Aurinkosähköä voidaan pitää yhtenä varteenotettavimmista energiamuodoista, sillä on arvioitu, että maapallolle tulee auringon säteilynä energiaa enemmän tunnin aikana, kuin koko maapallon väestön energiantarve on vuodessa [1]. Aurinkopaneelien markkinahinnat ovat laskeneet rajusti viime vuosina tehden aurinkosähkön hinnan kilpailukykyisemmäksi. Näin ollen aurinkosähkö on vakiinnuttamassa asemaansa tapana tuottaa sähköenergiaa aikana, jolloin ilmaston lämpeneminen ja toisaalta jatkuvasti kasvava energiantarve ovat synnyttäneet tarpeen kehittää energiantuotantoa suuntaan, joka takaa myös tulevaisuudessa elintason kehittyneessä maailmassa ja toisaalta parantaa elintasoja kehittyvissä maissa.

Aurinkosähköjärjestelmä koostuu aurinkopaneelien ohella järjestelmän BOS (Balance of Systems) -laitteistosta, joka koostuu verkkoon kytketyssä järjestelmässä aurinkovaihtosuuntaajasta, joka sisältää maksimitehopisteen seurannan [1]. Aurinkosähköjärjestelmien tehojen kasvaessa huomio kiinnittyy yhä enemmän henkilöturvallisuuden varmistamiseen, sekä laitteiston suojaamiseen vikavirroilta. Erilaiset vikatilanteet voivat aiheuttaa sähköiskuvaaran järjestelmän käyttäjälle. Lisäksi kytkettäessä useita paneeliketjuja rinnan aurinkogeneraattorin ulostulotehon nostamiseksi paneelien vikaantuminen voi aiheuttaa takavirraksi kutsutun vikavirran, joka kuumentaessaan johtimia ja paneeliketjun paneeleita voi aiheuttaa tulipalovaaran. Nykyisin takavirralla suojaudutaan tyypillisesti aurinkosähköjärjestelmiin tarkoitetuilla PV (Photovoltaic) -sulakkeilla ja sarjadiodeilla. Lisäksi eristysviat mahdollistavat maavikavirran kulkemisen aurinkogeneraattorissa, mikä aiheuttaa puolestaan vaaran järjestelmän käyttäjälle tai korjaajalle. Toistaiseksi ei ole kuitenkaan olemassa yhtenäistä standardia, joka määräisi aurinkogeneraattorin vikavirtasuojauksesta.

Tässä työssä perehdytään aurinkosähköjärjestelmien vikavirtasuojaukseen ja sen toteutustapoihin. Aluksi luvussa 2 tarkastellaan aurinkosähköjärjestelmää ja siihen kuuluvaa laitteistoa ja esitellään sekä aurinkogeneraattorin että aurinkovaihtosuuntaajan ominaisuuksia aurinkogeneraattorin vikavirtasuojauksen näkökulmasta. Tämän jälkeen luvussa 3 tarkastellaan aurinkosähköjärjestelmässä esiintyviä vikavirtoja ja pohditaan mahdollisia vikatilanteita. Luvussa 4 esitetään mahdollisia toteutuksia elektroniselle sulakkeelle aurinkosähköjärjestelmissä ja esitellään simulointimallin avulla erään ratkaisun toimintaa. Kappaleessa 5 tehdään yhteenveto työn lopputuloksista.

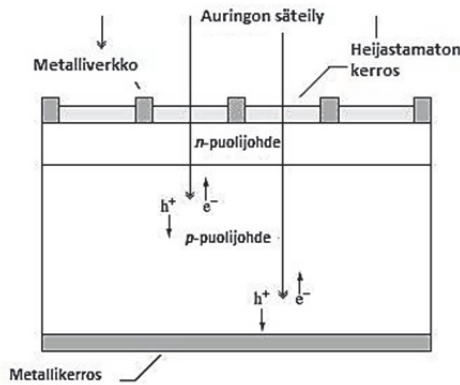
2 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Aurinkosähköjärjestelmäksi kutsutaan järjestelmää, jossa aurinkopaneeleilla muunnetaan auringon säteilyenergiaa suoraan sähköenergiaksi. Aurinkosähköjärjestelmän pienin rakennuselementti on aurinkokenno. Aurinkopaneelissa useita aurinkokennoja on kytketty sarjaan jännitteen nostamiseksi. Aurinkogeneraattori muodostuu puolestaan aurinkopaneelien sarjakytkenästä, eli paneeliketjusta. Paneeliketjuja voidaan generaattorissa edelleen kytkeä rinnan halutun kokonaistehon saavuttamiseksi. Aurinkosähköjärjestelmän muodostavat aurinkopaneelit, tarvittava kaapelointi, ylivirta- ja ylijännitesuojauskomponentit, kuten sulakkeet, sarjadiodit ja varistorit, DC- ja AC- verkkokatkaisijat sekä verkkoon kytketyssä järjestelmässä maksimitheopisteen seuranta-algoritmilla varustettu verkkovaihtosuuntaaja. Vaihtosuuntaajalla muunnetaan aurinkogeneraattorin tuottama tasavirta jakeluverkon vaihtovirraksi. Tässä työssä keskitytään pienjänniteverkkoon kytketyn aurinkogeneraattorin vikavirtasuojaukseen.

2.1 Aurinkokenno ja aurinkopaneeli

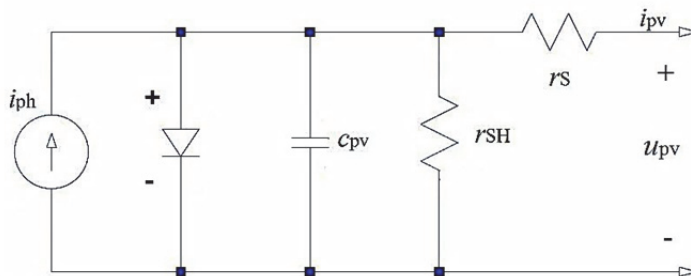
Aurinkokenno on tyypillisesti yksi- tai monikiteisestä seostetusta piistä valmistettu diodin kaltainen puolijohdekomponentti. Diodin tapaan myös aurinkokenno on johtava kytkettäessä myötäsuntainen jännite sen yli valaisemattomissa olosuhteissa. Kennon toiminta eroaa kuitenkin merkittävästi diodin toiminnasta sen ollessa valaistussa ympäristössä. Tällöin riittävän voimakas valo sopivalla aallonpituudella pystyy virittämään elektroneja puolijohdesta korkeammalle energiatilalle [2]. Kun kennon ulostulonapoihin kytketään tässä tilanteessa ulkoinen kuorma, sähkövirta kulkee kuorman läpi [2].

Kaupallisissa aurinkopaneeleissa käytettävät aurinkokennot valmistetaan tyypillisesti yksi- tai monikiteisestä piistä. Kuvassa 2.1. on kidepiikennon tyypillinen rakenne. Piitä käytetään kennojen valmistusmateriaalina sen edullisuuden, hyvän saatavuuden ja hyvin tunnetun valmistustekniikan takia. [2]



Kuva 2.1 Kiteisestä piistä valmistetun aurinkokennon rakenne [2].

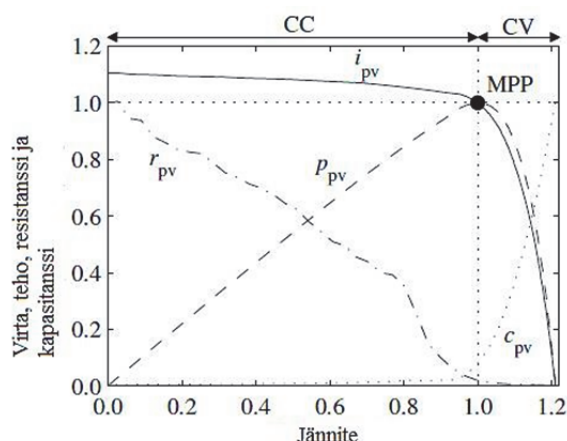
Aurinkokennolle ominainen virta-jännite -käyrä syntyy kennon diodiominaisuuksista. Aurinkokennoa voidaan mallintaa kuvan 2.2 sijaiskytkennällä, niin sanotulla yksidiodimallilla.



Kuva 2.2. Aurinkokennon yksidiodimalli [3].

Sijaiskytkennässä i_{ph} on aurinkokennossa valosähköisen ilmiön seurauksena muodostuva virta. Kennon ulostulovirtaa kuvaa i_{pv} . Diodi kuvaa kennon PN-liitosta, joka aiheuttaa aurinkokennon epälineaarisen virta-jännite-käyttäytymisen. Rinnakkaisresistanssi r_{SH} kuvaa kennon vuotoresistanssia ja r_S järjestelmän liitosten ja johtimien resistansseja, sekä c_{pv} kennon sisäistä kapasitanssia. Sarjaresistanssi r_S ei vaikuta kennon avoimen piirin jännitteeseen, mutta pienentää kennon oikosulkuvirtaa ja maksimitehopisteen jännitettä ja tehoa. Rinnakkaisresistanssi r_{SH} puolestaan ei vaikuta kennon oikosulkuvirtaan, mutta alentaa niin ikään kennon maksimitehopisteen virtaa ja jännitettä. [3]

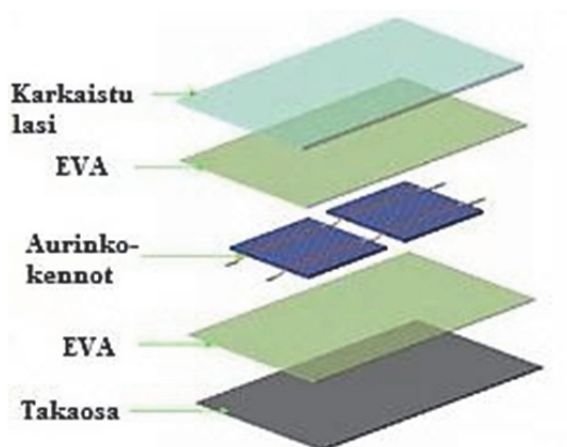
Kuva 2.3. esittää kiteisestä piistä valmistetun aurinkokennon ulostulovirtaa i_{pv} , dynaamista resistanssia r_{pv} , sisäistä kapasitanssia c_{pv} ja ulostulotehoa p_{pv} ulostulojännitteen funktiona. Kennon ulostulovirta pysyy lähestulkoon vakiona vakiovirta-alueella (CC), jolloin kennon dynaaminen resistanssi on suurimmillaan pienentyen lähestyttäessä maksimitehopistettä MPP ja kenno toimii vakiovirtalähteenä [4]. Vakiojännitealueella (CV) puolestaan kennon jännite pysyy lähestulkoon vakiona ja dynaaminen resistanssi on hyvin lähellä nollaa [4]. Aurinkokennon sisäinen kapasitanssi on pieni, kun kennon ulostulojännite on lähellä oikosulkua, mutta alkaa kasvaa voimakkaasti maksimitehopisteen jälkeen ja on suurimmillaan kennon avoimen piirin jännitteellä [5].



Kuva 2.3. Kiteisestä piistä valmistetun aurinkokennon ulostulovirta, ulostuloteho, dynaaminen resistanssi ja sisäinen kapasitanssi ulostulojännitteen funktiona [5].

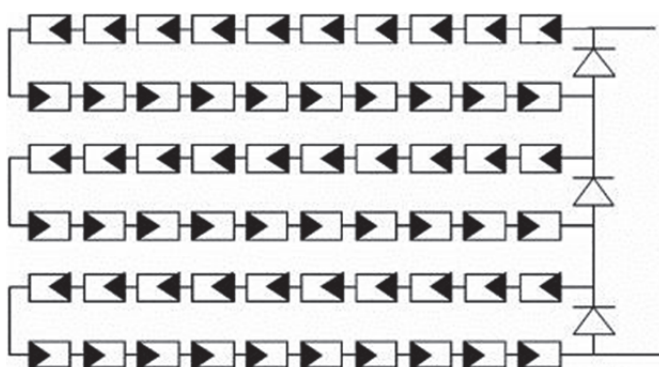
Aurinkopaneelissa aurinkokennot on kytketty sarjaan, jolloin paneelin ulostulojännite on sarjaan kytkettyjen kennojen ulostulojännitteiden summa. Paneelin ulostulovirta on yhden kennon ulostulovirran suuruinen, sillä sarjakytkenässä jokaisen kennon läpi kulkee samansuuruinen virta. Kiteisestä piistä valmistettujen aurinkokennojen tyypillinen hyötysuhde, eli kennon sähkötehoksi muuntama osuus auringon säteilytehosta on noin 13 -14 % [6]. Hyötysuhdetta rajoittaa piipuolijohteen kyky muuntaa auringon säteilyä sähköenergiaksi. Näin ollen, jotta paneelin ulostuloteho olisi verkkosähköntuotannon kannalta riittävä, aurinkopaneeleista on tehtävä pinta-alaltaan suhteellisen kookkaita.

Aurinkopaneeli on tyypillisesti kehystetty alumiinikehyksellä ja päällystetty karkaistulla lasilla, jonka alla on auringonvalon heijastumista estävä kerros. Aurinkokennot on kytketty sarjaan ja paneelin eri kerrokset eristetty esimerkiksi etyleenivinyylisetaatilla (EVA), joka toimii sähköisenä eristeenä ja suojaa eri kerroksia muiden muassa kosteudelta. Paneelin takaosa on hankauksenkestävää polymeerimateriaalia, joka toimii myös sähköisenä eristeenä. Paneelin takaosassa on kytkentärasia jonka kautta paneelit kytketään toisiinsa aurinkogeneraattorin muodostamiseksi [6]. Kuvassa 2.4. on periaatekuva aurinkopaneelin kerroksittaisesta rakenteesta.



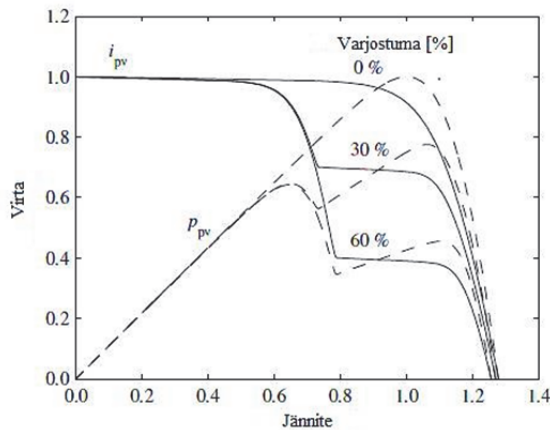
Kuva 2.4. Aurinkopaneelin rakenne [6].

Paneelissa kennojen rinnalle on kytketty ohitusdiodit siten, että tyypillisesti 15 -20 sarjaan kytketyn kennon rinnalla on yksi myötäsuntaan kytketty diodi. Kuvassa 2.5 näkyvät paneelien rinnalle kytketyt ohitusdiodit, sekä paneelien kanssa sarjaan kytketyt sarjadiodit. Sarjadiodeista kerrotaan lisää tässä työssä vikavirtasuojauksa koskevassa kappaleessa 3.6.1



Kuva 2.5. Ohitusdiodien kytkeminen [7].

Kun osa paneelin kennoista varjostuu esimerkiksi lumen tai lehtien takia, ohitusdiodin tehtävänä on estää varjostuneiden kennojen paikallinen kuumeneminen tarjoamalla valaistujen kennojen tuottamalle virralle reitti varjostuneiden kennojen ohi [8]. Aurinkopaneelin I-V -käyrässä ohitusdiodien vaikutus näkyy siten, että käyrälle muodostuu useita lokaaleja maksimitehopisteitä osittaisin varjostumisen aikana. Kuva 2.6 havainnollistaa ohitusdiodien vaikutusta aurinkopaneelin I-V- ja P-V-käyriin.

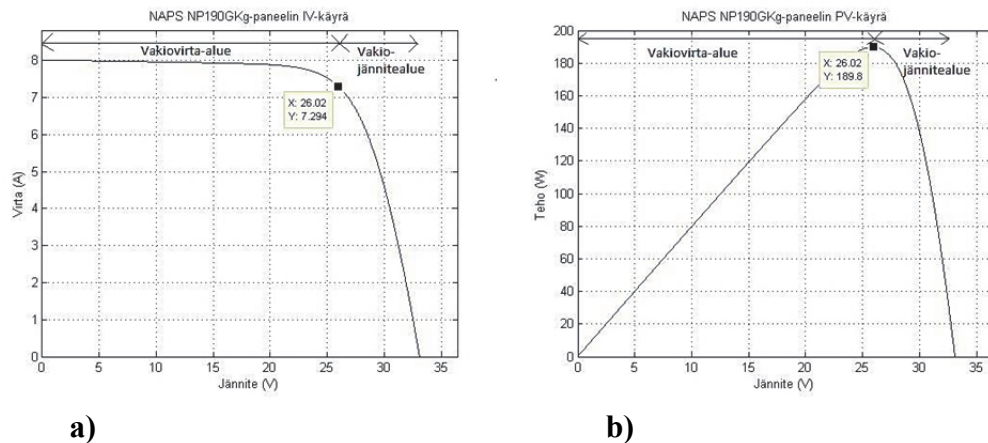


Kuva 2.6. Ohitusdiodien vaikutus maksimitehopisteeseen [5].

Piikidepaneelille vaihtoehtoista teknologiaa edustaa ohutkalvopaneeli, joka tehdään tyypillisesti amorfisesta piistä valmistetuista kennoista. Ohutkalvopaneelit ovat rakenteeltaan ohuita ja joustavia. Niitä voidaan kuitenkin käyttää kehystettyinä kidepiipaneelien tapaan eri tehoisissa aurinkogeneraattoreissa. Yksi- tai monikiteisestä piistä valmistettuihin paneeleihin verrattuna ohutkalvotekniikan etuna ovat pienemmät materiaalmäärät ja kevyemmät rakennuselementit. Ohutkalvotekniikalla pyritään kehittämään korkeamman hyötysuhteen aurinkokennoja. Ohutkalvokennojen paremman hyötysuhteen mahdollistaa se, että ne koostuvat useasta kerroksesta, joista jokainen absorboi auringon säteilyä sen eri taajuusalueelta, kun taas piikidekenno absorboi auringon säteilyä vain piille ominaiselta aallonpituudelta [9]. Solar Junction on onnistunut kehittämään ohutkalvokennon, jonka hyötysuhde on 44 % [9]. Ohutkalvokennot eivät ole vielä toistaiseksi laajassa käytössä, mutta tässä työssä sivutaan myös ohutkalvokennoista valmistettujen paneelien ominaisuuksia virrankeston ja muiden sähköisten ominaisuuksien osalta vikavirtasuojasta ajatellen.

Maavuotovirtojen muodostumisen kannalta aurinkosähköjärjestelmän suunnittelussa on huomioitava aurinkopaneelin levyrakenteesta johtuva maakapasitanssi c_{st} paneelin ja maan välillä, joka on suoraan verrannollinen aurinkopaneelin pinta-alaan ja kääntäen verrannollinen sen paksuuteen. Näin ollen pinta-alaltaan samankokoisen ohutkalvopaneelin maakapasitanssi on moninkertainen piikidepaneelin verrattuna sen ohuemman rakenteen vuoksi [10]. Maakapasitanssi muodostaa maadoitetun aurinkogeneraattorin tapauksessa ikään kuin suurikokoisen kondensaattorin, jonka toisena elektrodina toimii aurinkopaneelien muodostama generaattori ja toisena paneelien maadoitettu kehys. Mikäli paneelit on maadoitettu, vaihtosuuntaajan kytkentätaajuuksien jännitekomponenttien kytkeytymien maakapasitanssin yli voi aiheuttaa maavuotovirran, mikäli aurinkogeneraattoria ja vaihtosuuntaajaa ei ole muuntajalla galvaanisesti erotettu. Sääolosuhteet vaikuttavat paneelin maakapasitanssin arvoon siten, että ilmankosteus kasvattaa kapasitanssin arvoa [10; 11].

Aurinkopaneelin toimintakäyrä, eli virta-jännite -käyrä esittää paneelin tuottamaa virtaa i_{pv} napojen välisen jännitteen u_{pv} funktiona. Maksimitehopisteessä paneelin ulostuloteho saa maksimiarvonsa. Kuvassa 2.7 on esitetty NAPS Systems Oy:n NP190GKg -aurinkopaneelin virta-jännitekäyrä, sekä teho-jännite -käyrä. Maksimitehopisteen jännitettä alemmilla jännitteillä paneeli toimii vakiovirta-alueella, jolloin sen ulostulovirta i_{pv} pysyy lähes vakiona. Maksimitehopisteen jännitteen ylityttyä alkaa paneelin virta laskea nopeasti ja tällöin paneeli toimii vakiojännitealueella. Aurinkopaneelin ulostulovirta- ja jännite voivat saada arvoja vain virta-jännite -käyrältä. Toisin sanoen jokaista ulostulojännitteen arvoa vastaa tietty ulostulovirran arvo. Maksimitehopiste sijoittuu I-V -käyrän polvikohtaan ja P-V -käyrän huippukohtaan.



Kuva 2.7. NAPS Systems Oy:n NP190GKg –aurinkopaneelin a) I-V-käyrä ja b) P-V-käyrä. Vakiovirta- ja vakiojännitealueet on merkitty kuviin.

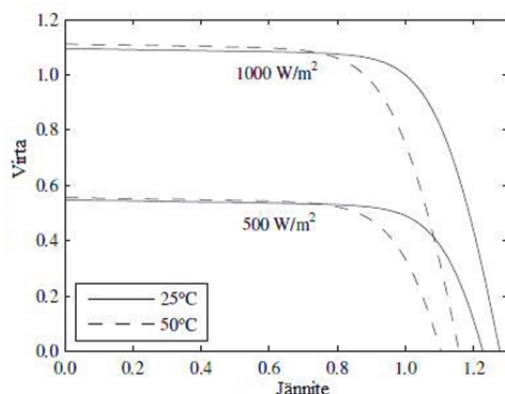
2.2 Sähköenergian tuottaminen aurinkopaneeleilla

Aurinkopaneeleita voidaan kytkeä sarjaan ja rinnan halutun ulostulojännitteen ja -virran saavuttamiseksi. Aurinkogeneraattorin ulostulojännite nousee suoraan suhteessa paneeliketjuun sarjaan kytkettyjen paneelien määrään ja yhden paneeliketjun ulostulojännite on sama kuin koko aurinkogeneraattorin ulostulojännite. Paneeliketjun ulostulojännite tulee mitoittaa siten, ettei se missään toimintapisteessä ylitä järjestelmän vaihtosuuntaajan DC-jännitteenkestoa.

Kytettäessä aurinkopaneeleita generaattoriksi, kytketään paneelit sarjaan siten, että paneeliketjut ovat keskenään mahdollisimman identtisiä. Toisin sanoen jokaiseen ketjuun kytketään yhtä monta sähköisiltä ominaisuuksiltaan mahdollisimman identtistä paneelia, jotka on asennettu aurinkoon nähden samaan kulmaan, jotta valaistusolosuhteet ovat kaikilla paneeleilla mahdollisimman samankaltaiset. Asennettaessa on myös huomioitava, ettei mikään paneeliketju tai sen osa ole pysyvästi varjostunut.

Aurinkopaneelien tuottama virta on suoraan verrannollinen auringon säteilyintensiteettiin. Auringon säteilykulman muuttuessa tai paneelien varjostuessa myös paneelien tuot-

tama teho alenee. Toisaalta matalammassa ympäristön lämpötilassa ja samoissa säteilyolosuhteissa paneelien tuottama ulostuloteho on korkeampi, kuin korkeammassa ympäristön lämpötilassa, sillä paneelin ulostulojännite nousee sen lämpötilan laskiessa, kuten kuvasta 2.8 nähdään [4].



Kuva 2.8. Lämpötilan ja säteilyintensiteetin vaikutus aurinkopaneelin ulostulojännitteeseen ja -virtaan [4].

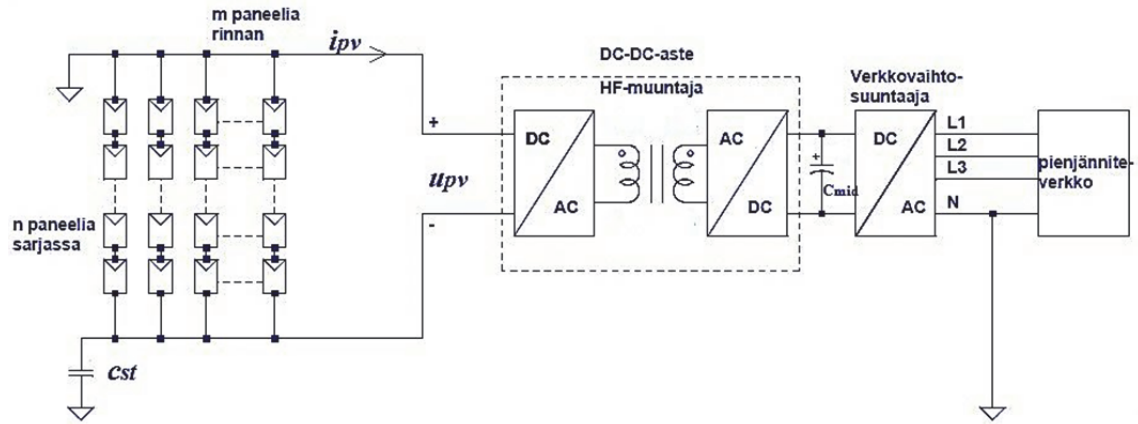
Paneelivalmistaja ilmoittaa paneelien virta- ja jännitearvot STC- eli standarditestiolosuhteissa, eli auringon säteilyintensiteetin ollessa 1000 W/m^2 , kennon lämpötilan ollessa 25°C ja Air Mass-, eli ilmamassaluvun ollessa 1,5. Ilmamassaluku kuvaa pilvettömän ilmakehän vaikutusta auringon säteilyintensiteettiin. Se määritellään säteilyn ilmakehässä kulkeman matkan ja ilmakehän paksuuden osamääränä. Standarditestiolosuhteet ovat teoreettiset ja luotu eri valmistajien paneelien vertailun mahdollistamiseksi. Sen sijaan käytännön suunnittelua varten paneelivalmistaja ilmoittaa tuotespesifikaatiossa myös paneeleidensa virta- ja jännitearvot NOCT-, eli ominaistoimintalämpötilassa. Ominais-toimintalämpötila määritellään auringon säteilyintensiteetin ollessa 800 W/m^2 , ympäristön lämpötilan ollessa 20°C , tuulennopeuden ollessa 1 m/s ja avoimen piirin jännitteellä. Ominais-toimintalämpötila riippuu paneelin tehosta ja saa eri arvon eri valmistajien tuotteita vertailtaessa. Järjestelmän suunnittelija voi sen avulla esimerkiksi arvioida säteilyintensiteetin muutoksen vaikutusta paneelin lämpötilaan ja näin ollen ulostulojännitteeseen ja -tehoon.

2.3 Aurinkovaihtosuuntaaja

Aurinkovaihtosuuntaajalla tarkoitetaan tässä työssä pienjänniteverkkoon vaihtovirtaa tuottavaa vaihtosuuntaajaa. Vaihtosuuntaajan tulopuolella on DC-DC -aste, jonka avulla tehoa voidaan siirtää aurinkogeneraattorin jännitettä korkeammalle jännitetasolle.

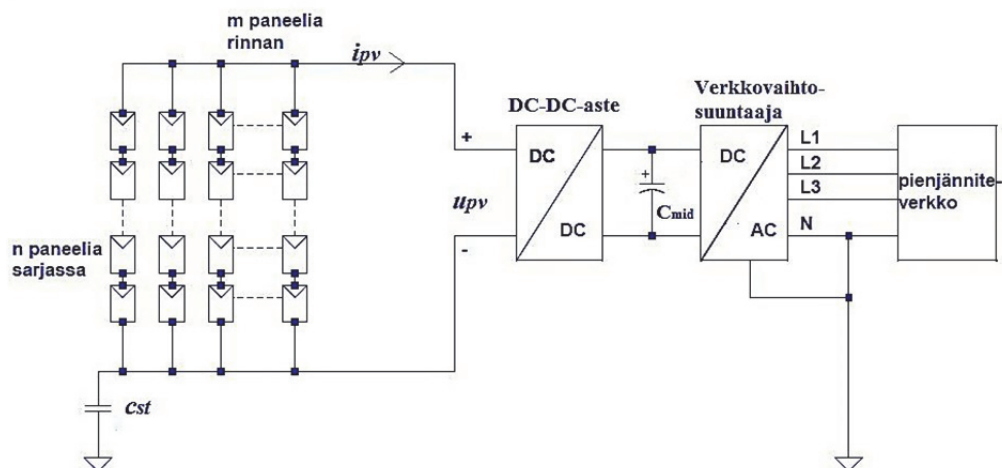
Aurinkovaihtosuuntaaja voi olla joko galvaanisesti erotettu tai erottamaton. Toisin sanoen aurinkogeneraattori ja jakeluverkko on erotettu toisistaan muuntajalla tai vaihtosuuntaaja on toteutettu ilman muuntajaa. Muuntajalla tehty galvaaninen erotus voidaan lisäksi toteuttaa joko verkkomuuntajalla jakeluverkon puolelta tai suurtaajuus-

muuntajalla DC-puolelta. Kuvassa 2.9 on DC-puolelta suurtaajuusmuuntajalla galvaanisesti erotettu aurinkosähköjärjestelmä. Generaattorin paneelit on maadoitettu. Kuvassa c_{st} kuvaa aurinkogeneraattorin maakapasitanssia, u_{pv} aurinkogeneraattorin ulostulojännitettä ja i_{pv} sen ulostulovirtaa. DC-välipiirin kondensaattoria kuvaa C_{mid} . Koska järjestelmät, joissa galvaaninen erotus on tehty verkkomuuntajalla, ovat nykyään harvinaisia, esitellään tässä työssä vain suurtaajuusmuuntajalla toteutettu ratkaisu.



Kuva 2.9. Suurtaajuusmuuntajalla galvaanisesti erotettu pienjänniteverkkoon kytketty kolmivaiheinen aurinkosähköjärjestelmä.

Galvaanisesti erotetussa järjestelmässä aurinkogeneraattori ei ole sähköisesti yhteydessä jakeluverkkoon, jolloin DC-virtaa ei pääse AC-verkkoon. DC-virta voi AC-verkkoon päästessään aiheuttaa verkkomuuntajan saturoitumisen [11]. Kuitenkin galvaanisesti erottamattomat, eli ilman muuntajaa toteutetut järjestelmät ovat tulleet yhä yleisemmiksi, sillä ilman muuntajaa toteutetun järjestelmän hyötysuhde on parempi, kuin galvaanisesti erotetun, koska järjestelmään ei aiheudu häviöitä muuntajasta [11]. Lisäksi muuntaja kasvattaa järjestelmän kokoa [11]. Käytettäessä suurtaajuusmuuntajaa tulee järjestelmästä monimutkainen useiden tehoasteiden takia [11], kuten kuvasta 2.9 nähdään. Galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä aurinkogeneraattorin ja jakeluverkon välillä on sähköinen yhteys, jolloin on varmistuttava siitä, että aurinkogeneraattorin tasavirtaa ei pääse AC-verkkoon ja toisaalta, ettei vaihtosuuntaajalta aurinkogeneraattorille päin pääse korkeataajuisia jännitekomponentteja, jotka saattavat aiheuttaa maavuotovirtoja. Maavuotovirroista voi aiheutua sähkömagneettisia häiriöitä, verkkovirran säröytymistä ja tehohäviöitä järjestelmään [11]. Tämä tulee ottaa huomioon silloin, kun aurinkogeneraattorin paneelit on maadoitettu [11]. Kuvassa 2.10 on esitetty galvaanisesti erottamaton kolmivaiheinen aurinkosähköjärjestelmä. Aurinkogeneraattorin maakapasitanssia kuvaa kuten edellä c_{st} , aurinkogeneraattorin ulostulojännitettä u_{pv} , ulostulovirtaa i_{pv} ja DC-välipiirin kondensaattoria C_{mid} .



Kuva 2.10. Galvaanisesti erottamaton kolmivaiheinen pienjänniteverkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä.

Tässä työssä käsiteltävän aurinkovaihtosuuntaajan DC-välipiirin maksimi toimintajännite on 1 kV ja sillä tuotetaan virtaa pienjänniteverkkoon. Pääpaino tässä työssä on galvaanisesti erottamattomien järjestelmien ja DC-puolelta suurtaajuusmuuntajalla galvaanisesti erotettujen järjestelmien tarkastelussa.

2.3.1 Maksimitehopisteen seuranta

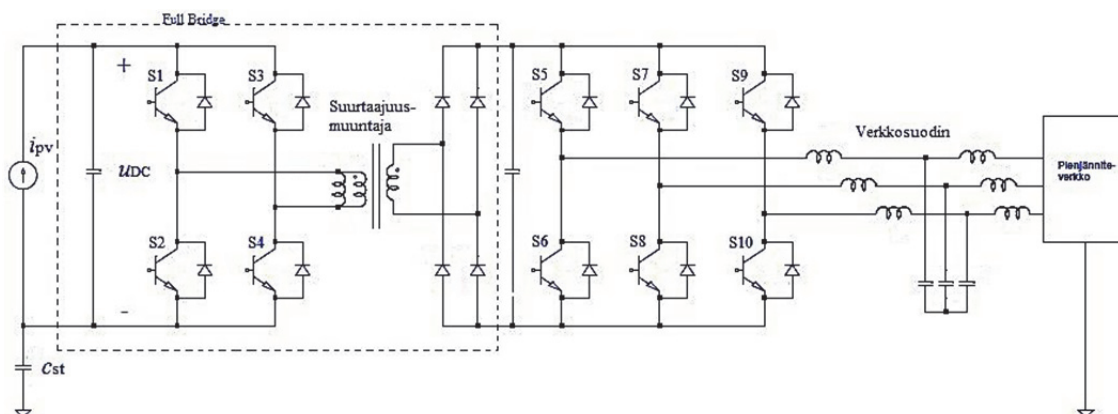
Aurinkogeneraattorin ulostulovirta- ja jännite riippuvat kulloisistakin säteily- ja lämpötilaolosuhteista. Auringon säteilyintensiteetin muuttuessa muuttuu näin ollen myös generaattorin ulostuloteho. Jotta aurinkogeneraattorilla saataisiin vaihtuvissa olosuhteissa tuotettua mahdollisimman paljon sähkötehoa, tulee järjestelmässä olla maksimitehopisteen seuranta. Maksimitehopisteen seuranta perustuu siihen, että maksimitehopisteessä ulostulotehon muutos generaattorin ulostulojännitteen suhteen on nolla. Maksimitehopisteen seurannan tekee haasteelliseksi se, että säteilyolosuhteiden muuttuessa seurannan on pysyttävä mukana reaaliaikaisesti.

Maksimitehopisteen seuranta toteutetaan siten, että aurinkogeneraattorin ulostulossa on jatkuva lähtövirran ja -jännitteen mittausta, joiden perusteella maksimitehopistettä seurataan ja säädetään aurinkogeneraattorin ulostulojännitettä. Maksimitehopisteen seurantaan on kehitetty erilaisia algoritmeja, joiden avulla päästään tasaisissa säteilyolosuhteissa jopa yli 99 %:n tehon seurantaan [12]. Yksinkertaisempi algoritmi on epätarkka, mutta reagoi muutokseen nopeasti, kun taas monimutkaisempi algoritmi seuraa muutosta tarkasti, mutta on hidas. Mitä paremmin maksimitehopisteen muutoksia pystytään seuraamaan, sitä paremmalla hyötysuhteella aurinkogeneraattorin tuottamaa sähkötehoa saadaan syötettyä verkkoon. [13; 14; 15]

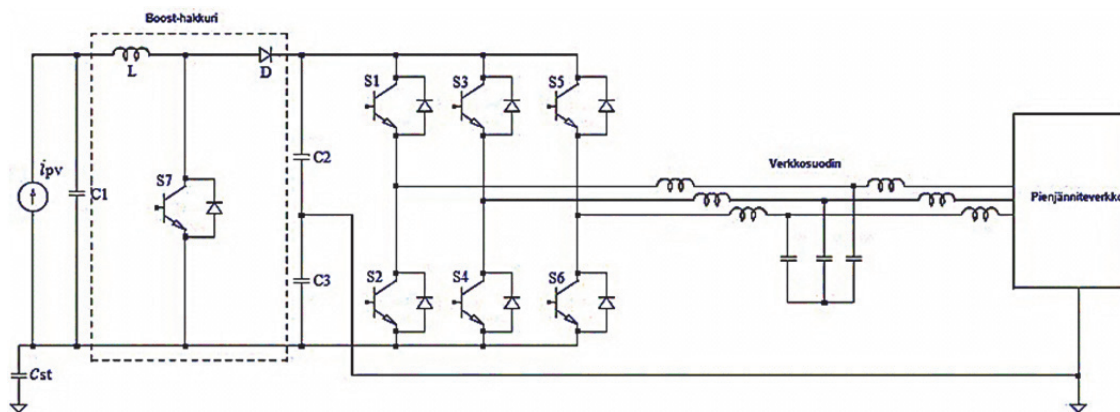
2.3.2 DC-DC-aste ja verkkovaihtosuuntaaja

DC-DC- asteen tehtävänä on nostaa aurinkogeneraattorin tuottama DC-jännite tarvittaessa verkkovaihtosuuntaajan toimintajännitteen tasolle. DC-DC -aste voidaan toteuttaa esimerkiksi Boost- tai Full Bridge -hakkurilla. Kolmivaihevaihtosuuntaajalla tuotetaan virtaa kolmivaiheiseen jakeluverkkoon. Vaihtosuuntaajatopologioita on lukuisia, joista tässä työssä esitellään yksi suurtaajuusmuuntajalla galvaanisesti erotetussa järjestelmässä käytettävä ratkaisu ja kaksi galvaanisesti erottamattomaan järjestelmään sopivaa ratkaisua.

Kuvan 2.11 kolmivaiheinen VSI (Voltage Source Inverter) -verkkovaihtosuuntaaja on DC-puolelta suurtaajuusmuuntajalla galvaanisesti erotettu AC-verkosta. DC-DC -aste on toteutettu Full Bridge -hakkurilla, joka on ympäröity kuvaan katkoviivalla. Full Bridge-hakkuri muodostuu kahdesta kytkinparista. Jokaisen kytkimen rinnalle on kytketty diodi. Kytkimiä S1-S4 kytetään siten, että kytkinparin (S1 ja S4 tai S2 ja S3) kytkimistä toisen ollessa johtava on toinen johtamaton. [16] Kytkimillä S5-S10 muodostetaan sinimuotoista verkkovirtaa, joka syötetään verkkosuotimen kautta pienjänniteverkkoon. Vaihtosuuntaajan ulostulovirta on kaksitasoinen ja sen vaihekohtainen ulostulojännite vaihtelee $\frac{u_{DC}}{2}$:n ja $-\frac{u_{DC}}{2}$:n välillä. Kuvassa 2.12 olevan VSI-vaihtosuuntaajan sisäänmenoon on puolestaan kytketty Boost-hakkuri.

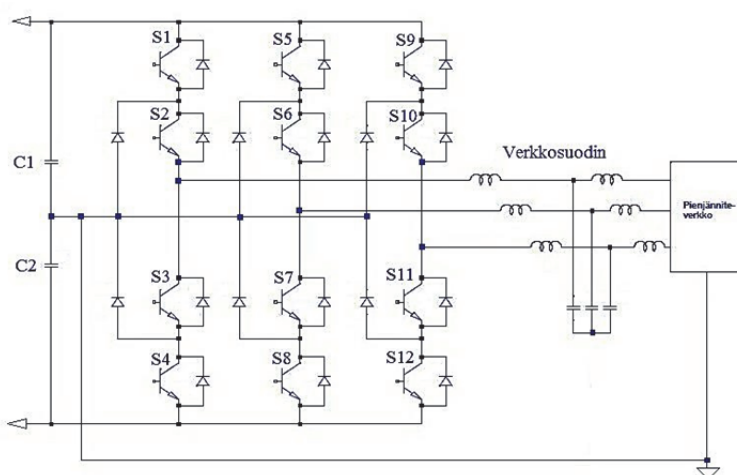


Kuva 2.11. VSI-vaihtosuuntaajan DC-DC -aste on toteutettu Full Bridge -hakkurilla ja järjestelmä on galvaanisesti erotettu suurtaajuusmuuntajalla.



Kuva 2.12. VSI-vaihtosuuntaajan DC-DC -aste on toteutettu Boost-hakkurilla [17].

Kuvassa 2.13. oleva NPC-topologia on kolmivaiheinen vaihtosuuntaajatopologia, jonka ulostulovirta on kolmitasoinen. Vaihtosuuntaajan sisäänmenojännite, on jaettu kahtia ja maadoitettu keskipisteestään kolmen eri ulostulojännitetason aikaansaamiseksi. Näin vaihtosuuntaajan vaihekohtainen ulostulojännite voi olla $\frac{u_{DC}}{2}$, 0 V tai $-\frac{u_{DC}}{2}$. Vaihtosuuntaajan ulostulo kytketään verkkosuotimen kautta pienjänniteverkkoon.



Kuva 2.13. Kolmivaiheinen, keskipisteestä maadoitettu NPC-vaihtosuuntaaja [17].

Vaihtosuuntaajan säädön toteutus ja modulointialgoritmi vaihtelevat riippuen käytetystä topologiasta, mutta kaikille verkkoon kytketyille vaihtosuuntaajille yhteistä on, että niiden tulee toteuttaa verkkoon kytkettäviltä järjestelmiltä vaaditut ominaisuudet. Euroopassa noudatetaan Saksan pienjänniteverkkostandardia VDE-AR-N 4105:2011-08. Se määrittelee verkon jännitteen laadun, eli esimerkiksi THD-, eli verkon jännitteen harmonisen särön rajat, jännitteen, sekä taajuuden vaihtelulle sallitut rajat. [13; 18]

3 VIKATILANTEET AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMISSÄ

Kuten kaikissa sähkölaitteissa ja -järjestelmissä myös aurinkosähköjärjestelmässä voi esiintyä vikatilanteita, jotka vaarantavat järjestelmän käyttäjän turvallisuuden. Tällä hetkellä ei ole olemassa säädöstä, joka edellyttäisi vikavirtasuojauksia verkkoon kytkettyjen aurinkogeneraattorin vikavirtasuojauksia [19]. Generaattorin tuottaessa sähköä sen kaikkien paneeliketjujen ollessa identtisisissä säteilyolosuhteissa, generaattorissa ei voi esiintyä paneelien virrankeston ylittävää virtaa. Aurinkogeneraattorissa ylivirtasuojauksia tarvitaan mahdollisten vikavirtojen takia.

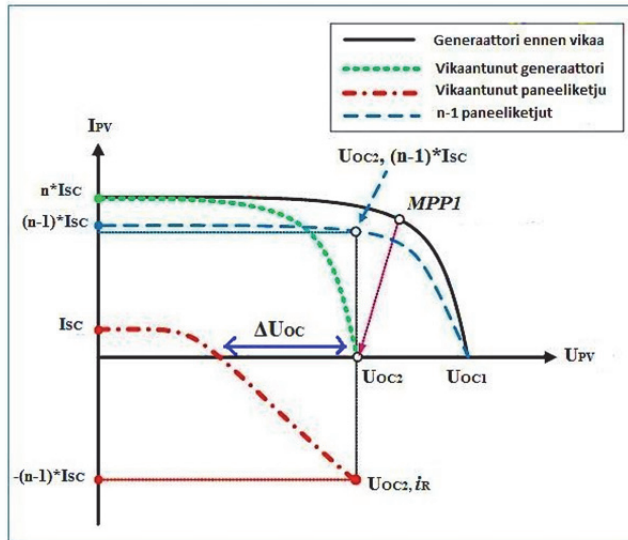
Suositus DC-puolen sulakkeiden tai sarjadiodien käytöstä tulee paneelivalmistajalta, mutta jää järjestelmän suunnittelijan harkintaan, halutaanko niitä käyttää vai ei [19]. On kuitenkin tilanteita, joissa vikavirtasuojauksia tarvitaan. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi laitteistoviat ja inhimillisestä virheestä johtuvat asennusvirheet. Aurinkosähköjärjestelmien kasvaessa teholtaan suuremmiksi myös järjestelmässä kulkevat vikavirratt kasvavat. Käytännössä suurten vikavirtojen esiintyminen on kuitenkin harvinaista.

Aurinkosähköjärjestelmien vikavirtasuojauksia tarkasteltaessa järjestelmän toimintaa on hyvä tarkastella sekä matalan että korkean säteilyintensiteetin aikana, jotta voidaan perustella suojauksen tarpeellisuus ja vertailla sen eri toteutustapoja. Lisäksi on mielekästä tarkastella takavirran esiintymisen mahdollisuutta järjestelmän normaalikäytön aikana ilmenevissä vaihtelevissa ympäristön olosuhteissa, sekä erilaisissa vikatilanteissa.

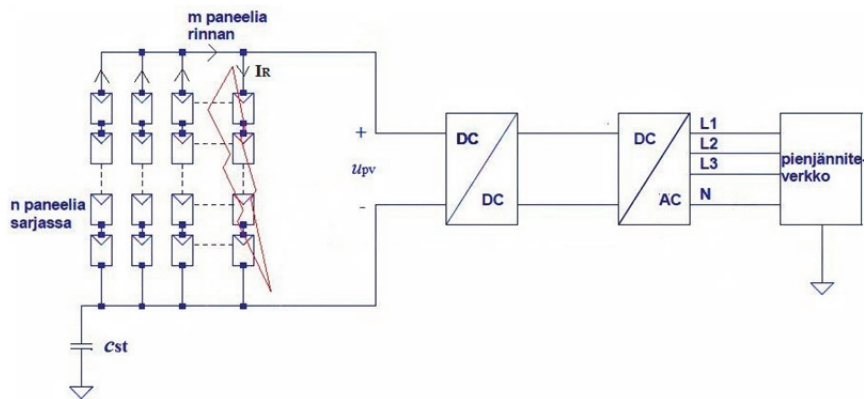
3.1 Takavirta ja maasulkuvika

Takavirraksi kutsutaan virtaa, joka on polariteetiltaan vastakkainen aurinkogeneraattorin tuottaman virran suuntaan verrattuna. Takavirran aiheuttaa yhden tai useamman paneeliketjun samanaikainen osittainen tai täydellinen oikosulku, jolloin paneeliketjun avoimen piirin jännite on voimakkaasti alentunut verrattuna muuhun generaattoriin. Muiden paneeliketjujen tuottama virta kulkee oikosulun läpi aiheuttaen voimakasta paikallista kuumenemista. Kuvassa 3.1 on esitetty takavirran syntyminen aurinkogeneraattorissa. Vikaantumaton aurinkogeneraattori toimii toimintapisteessä MPP1. Kun jonkin paneeliketjun avoimen piirin jännite putoaa, muuttuu generaattorin toimintapiste uuden, matalamman ulostulotehon I-V -käyrän avoimen piirin jännitteelle (kuvassa U_{OC2}). Tämä edellyttää, että jakeluverkosta ei voida syöttää tehoa aurinkogeneraattorille päin. Aurinkogeneraattorin vikaantumattomat paneeliketjut toimivat näin ollen toimintapisteessä

U_{OC2} . Tällöin oikosulun läpi kulkevan takavirran I_R suuruus on luettavissa negatiiviselta virta-akselilta U_{OC2} -jännitteen kohdalta ja riippuu osittain oikosulussa olevan paneeliketjun ja muiden paneelien avoimen piirin jännitteiden välisestä erosta ΔU_{OC} . Kuvassa 3.2 on lisäksi havainnollistettu virtapiirin avulla, miten takavirta I_R aurinkogeneraattorissa oikosulun aikana kulkee.



Kuva 3.1. Aurinkogeneraattorin I - V -käyrä paneeliketjun osittaisesta oikosulusta johtuvan takavirran kulkiessa [20].



Kuva 3.2. Takavirran virtatie aurinkogeneraattorissa paneeliketjun oikosulun aikana.

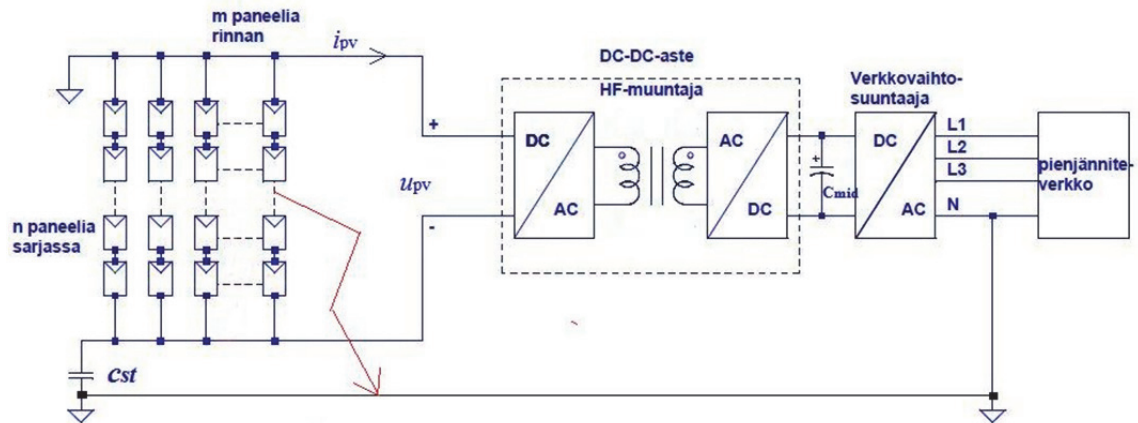
Mikäli aurinkovaihtosuuntaajan sisäänmenoon on kytketty vähemmän kuin kolme paneeliketjua, takavirtaa ei voi vikatilanteessa syntyä riittävästi aiheuttamaan haittaa laitteistolle, sillä takavirtaa voi muodostua vain sen verran, kuin jäljelle jääneet paneeliketjut tuottavat. Eli jos järjestelmässä on kaksi paneeliketjua kytkettynä rinnan ja toisen kautta alkaa kulkea takavirta, virran suuruus voi olla maksimissaan toisen paneeliketjun tuottama virta. Kun rinnan kytkettyjä paneeliketjuja on kolme tai useampia, mahdollinen takavirta voi nousta niin suureksi, että paneelien virrankesto ylittyy. Tällöin seurauksena on paikallinen kuumeneminen paneeliketjussa, mikä saattaa aiheuttaa tulipalo-

vaaran. Kaapeloinnin ja sulakkeiden mitoitusta käsitellään tässä työssä tarkemmin kapaleessa 3.6.

Toisaalta takavirran osalta on otettava huomioon myös auringon säteilyintensiteetin vaikutus takavirran suuruuteen. Kun auringon säteilyintensiteetti on matala, esimerkiksi $200 - 300 \text{ W/m}^2$, on myös generaattorin tuottama takavirta suhteessa pienempi kuin voimakkaan säteilyintensiteetin aikana [21]. Matalan säteilyintensiteetin aikana ei välttämättä synny takavirtaa, joka ylittäisi paneelien tai kaapeleiden virrankestoja tai aiheuttaisi voimakasta paikallista kuumenemistä järjestelmän osassa [21]. Toisaalta matalan säteilyintensiteetin aikana syntyvä laitteistovika voi jäädä kokonaan huomaamatta. Matalan säteilyintensiteetin aikana tapahtunutta vikaantumista ei välttämättä huomata jatkossakaan säteilyintensiteetin kasvaessa, sillä aurinkovaihtosuuntaajan maksimitehopisteen seuranta pyrkii optimoimaan generaattorin ulostulotehoa [21]. Jos vikaantuneen generaattorin toimintapisteen jännite, eli sen avoimen piirin jännite on riittävä ylläpitämään vaihtosuuntaajan toimintaa, maksimitehopisteen seuranta etsii generaattorille uuden toimintapisteen. Uudessa toimintapisteessä takavirta loppuu, joten generaattori tuottaa jälleen tehoa verkkoon ja näin ollen järjestelmässä oleva vika jää huomaamatta ja generaattorin ulostuloteho on pysyvästi alentunut verrattuna alkuperäiseen, vikaantumattoman generaattorin toimintapisteeseen. [21]

Maasulkuvialla tarkoitetaan käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan välistä eristysvikaa. Kaksoismaasululla tarkoitetaan puolestaan yhtä aikaa kahdessa tai useammassa kohdassa järjestelmää esiintyvää maasulkuvikaa. Aurinkosähköjärjestelmässä maasulkuvika voi aiheutua esimerkiksi aurinkogeneraattorin kaapeleiden tai paneelien vaurioitumisesta, kuten paneelin lasituksen rikkoutumisesta, korroosion aiheuttama metallikehyksen vikaantumisesta tai muutoin alentuneesta eristysresistanssista. Järjestelmätasolla tämän voivat aiheuttaa esimerkiksi materiaalien väsyminen vanhassa järjestelmässä sen altistuttua luonnon olosuhteille vuosikymmeniä, eläimen pureman aiheuttama kaapelin eristeen vaurioituminen tai esimerkiksi väärä johdinten asennustapa, jolloin kaapelit on asennettu siten, että niiden eristeet pääsevät hankautumaan rikki.

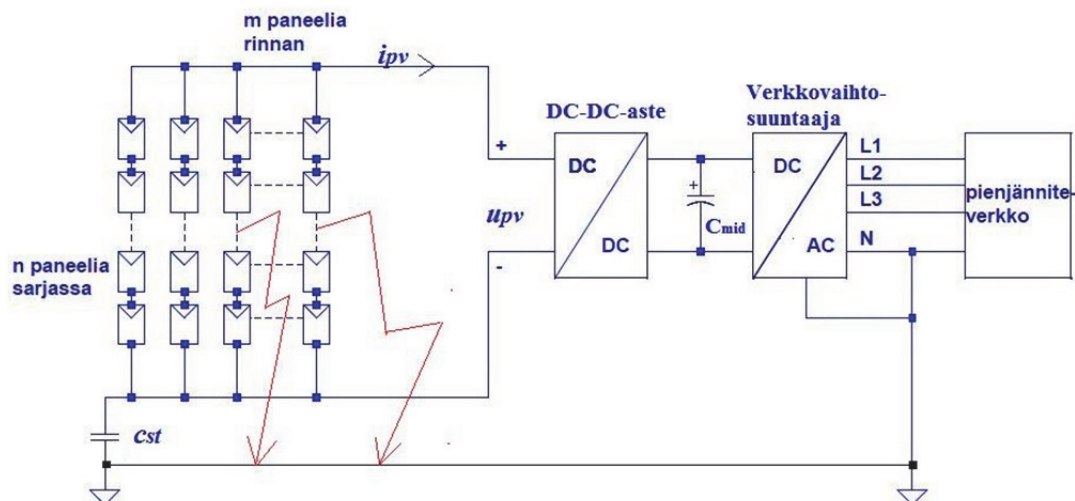
Maasulkuvikojen vaikutukset järjestelmän toimintaan riippuvat järjestelmän maadoitustavasta. Yksittäinen maasulkuvika mahdollistaa takavirran kulkemisen galvaanisesti erotetussa ja maadoitetussa, ja kaksoismaasulku galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä. Kuvassa 3.3 on suurtaajuusmuuntajalla galvaanisesti erotettu järjestelmä, jossa aurinkogeneraattorin paneelit on maadoitettu. Generaattorin maakapasitanssia kuvaa c_{st} . Generaattorin kolmannessa paneeliketjussa esiintyy yksittäinen maasulkuvika. Maadoitetussa generaattorissa jo yksi maasulkuvika mahdollistaa takavirran kulkemisen oikosulussa olevissa paneeliketjuissa. Takavirran kannalta pahin tilanne on yhden paneeliketjun täydellinen oikosulku, jolloin muiden paneeliketjujen tuottama virta kulkee oikosulun läpi.



Kuva 3.3. Yksittäinen maasulkuvika DC-puolelta suurtaajuusmuuntajalla galvaanisesti erotetussa järjestelmässä, jossa aurinkogeneraattori on maadoitettu DC+ -kiskosta.

Kuvassa 3.4 on galvaanisesti erottamaton järjestelmä, jossa esiintyy kaksoismaasulkuvika. Tämä aiheuttaa oikosuljettujen paneeliketjujen avoimen piirin jännitteiden laske-
misen, mikä mahdollistaa takavirran kulkemisen oikosulussa olevassa aurinkogeneraattorin osassa.

Maavuotovirta, jota käsiteltiin luvussa 2.3, puolestaan ei edellytä eristysvikaa, vaan aiheutuu kytkentätaajuuksien jännitekomponenttien kytkeytymisestä aurinkogeneraattorin maakapasitanssin yli. Maavuotovirta muodostuu maadoitettujen aurinkopaneelien, maakapasitanssin, DC- ja AC-verkkosuotimien ja jakeluverkon impedanssin muodostamassa värähtelypiirissä [5]. Maavuotovirtaa voidaan pienentää vaihtosuuntaajan suunnittelun avulla. Tässä työssä keskitytään aurinkogeneraattorin vikavirtasuojaukseen ja näin ollen maavuotovirtaa ei käsitellä tässä työssä enempää.

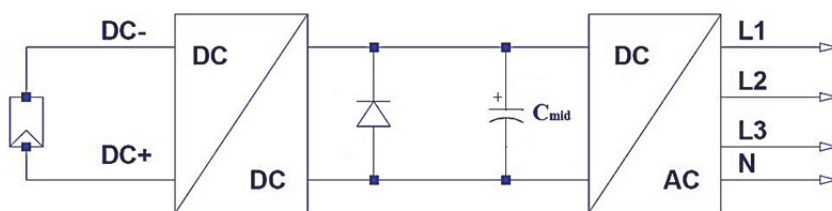


Kuva 3.4. Kaksoismaasulku galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä, jossa aurinkogeneraattori on maadoittamaton.

Nykyiset aurinkopaneelit täyttävät tyypillisesti IEC-61730-standardin mukaiset suojausluokka II –vaatimukset [22], mikä tarkoittaa, että aurinkopaneelit on kaksoiseristetty. [23] Myös aurinkogeneraattorin kaapelointi voi olla kaksoiseristetty. Jotkin vaihtosuuntaajavalmistajat suosittelevat kytkemään vain kaksoiseristettyjä paneeleita ja kaapeleita laitteisiinsa. Kovalle mekaaniselle rasitukselle altistuessaan niin paneeli, kuin kaapeli-kin voi eristysten osalta vaurioitua. Esimerkkejä mekaanisesta rasituksesta, joita aurinkogeneraattori voi kohdata, ovat esimerkiksi raskas lumikuorma ja myrskytuuli. Tuulen aiheuttamaan rasitukseen paneeliketjuille vaikuttaa myös niiden asennuskulma.

3.2 Asennusvirheet

Asennusvirheet, eli esimerkiksi paneeliketjujen asentaminen väärin päin järjestelmään aiheuttaa vääränapaisen jännitteen, jota DC-välipiirin elektrolyyttikondensaattori ei kestä. DC-välipiirin kondensaattorin rinnalle voidaan tästä syystä esimerkiksi kytkeä diodi kuvan 3.5 mukaisesti, jotta kondensaattorin yli oleva negatiivinen jännite ei voi nousta diodin myötäsuuntaista kynnysjännitettä suuremmaksi.



Kuva 3.5. DC-välipiirin kondensaattoria suojaava diodi.

Takavirran syntymisen kannalta paneelien sähköisten ominaisuuksien eroavaisuus ei kuitenkaan ole käytännössä merkityksellinen syy, koska valmistajan toleranssien puitteissa olevat eroavaisuudet muutoin keskenään saman tehoisissa saman valmistajan paneeleissa eivät voi aiheuttaa takavirtaa. [22]

3.3 Sääolosuhteiden vaikutus laitteiston vikaantumiseen

Aurinkogeneraattorin toimintaolosuhteet muuttuvat jatkuvasti sään, lämpötilan, vuorokaudenajan ja vuodenajan vaihtuessa. Myös maantieteellinen sijainti ja siitä johtuva sääolosuhteiden vaihtelu ja järjestelmän altistuminen kuumuudelle, kosteudelle, erittäin kylmille lämpötiloille, lumikuormille ja UV-säteilyn vaikutuksille saattaa vaikuttaa järjestelmän toimintaan. Vikavirtasuojauksen kannalta on pohdittava myös näiden seikkojen vaikutusta mahdolliseen vikavirtasuojauksen tarpeeseen.

Auringon säteilyintensiteetin pieneneminen esimerkiksi osittaisen varjostumisen takia alentaa paneelin ulostulovirtaa. Paneelin varjostuessa sen toimintalämpötila laskee, mikä johtaa sen ulostulojännitteen kasvamiseen. Näin ollen varjostuneen paneeliketjun avoimen piirin jännite on suurempi, kuin korkeammassa säteilyintensiteetissä toimivien

paneeliketjujen, joten takavirtaa ei voi syntyä. Jotta takavirta voisi muodostua, tarkoittaisi se käytännössä paneeliketjun täydellistä varjostumista, mikä on lähes mahdotonta siten, että muussa generaattorin osassa valaistusolosuhteet olisivat riittävät edelleen jatkamaan sähkön tuottamista.

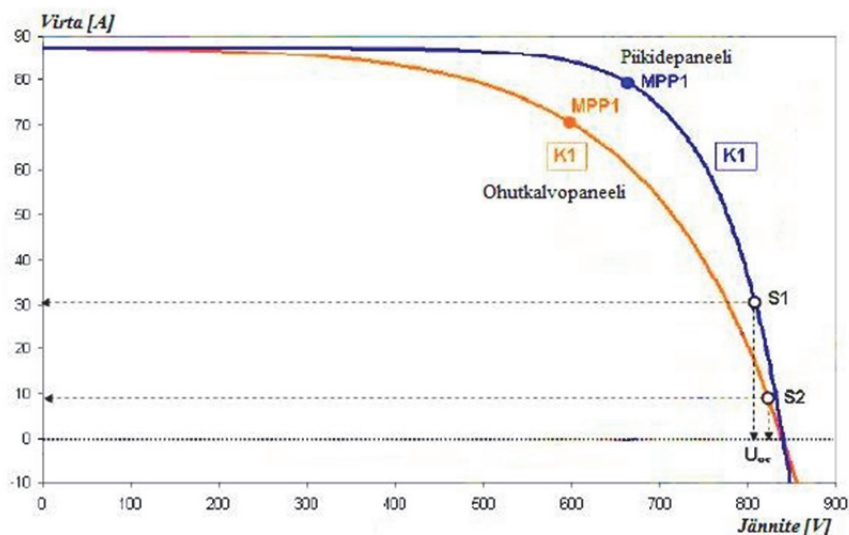
Sääolosuhteiden, kuten ilmankosteuden ja pitkän aikavälin lämpötilanvaihteluiden vaikutusta järjestelmälle puolestaan voidaan arvioida tekemällä paneeleille nopeutettuja sääolosuhdetestejä. Näin saadaan tietoa paneelien sääolosuhteiden kestosta. Laboratoriotestejä tarvitaan, koska isompia aurinkosähköjärjestelmiä on asennettu vasta muutamia vuosia, joten käytännön kokemusta paneelien sääolosuhteiden kestosta pitkällä aikavälillä ei toistaiseksi ole. Samoilla testeillä voidaan arvioida myös IEC 61215- standardin mukaisten testien kykyä simuloida sääolosuhteiden vaikutusta paneeleille käytännössä [23].

Säteilyintensiteetin ja sääolosuhteiden vaikutukset voivat olla välillinen syy, jonka takia järjestelmään syntyy maasulkuja, esimerkiksi korroosion ja erilaisten kulumisten takia. Vaikka myös maasulkuviat ovat käytännössä harvinaisia, niiden mahdollisuus kuitenkin todennäköisesti kasvaa järjestelmien vanhetessa. Aurinkogeneraattorissa esiintyvät eristysviat ovatkin todennäköisin syy vikavirtojen esiintymiseen [24].

Ukonilman aiheuttamilta jännitepiikeiltä voidaan suojautua varistorien avulla. Mikäli varistorit on kytketty aurinkosähköjärjestelmään, ne suojaavat sitä osaa järjestelmästä, johon varistorit on kytketty. Mikäli aurinkogeneraattoria ei ole suojattu varistoreilla suuret jännitepiikit voivat aiheuttaa ohitus- ja sarjadiodien vioittumisen. Useamman ohitusdiodin vioittuminen samassa paneelissa saattaa johtaa paneelin oikosulkuun. Ohitusdiodien rikkoutuminen on kuitenkin harvinaista. Lisäksi yhden ohitusdiodin rikkoutuminen ei voi aiheuttaa paneelin oikosulkuja, joten siitä ei ole haittaa, kun tarkastellaan takavirran syntymistä [25]. Eräs tapa kytkeä ylijännitesuojavaristori on esitetty sulakesuojausta koskevassa kappaleessa 3.6 kuvassa 3.11.

3.4 Kennomateriaalin vaikutus takavirtaan

Käytetyllä paneeliteknologialla on myös vaikutusta generaattorin vikavirtasuojaukseen ajatellen. Ohutkalvokennot ovat vasta kehitysvaiheessa, eikä niillä ole tehty yhtä perusteellisia tutkimuksia, kuin piikidepaneelien kohdalla, mutta on todettu, että ne kestävätkä takavirtaa heikommin, kuin piikidepaneelit [25]. Toisaalta myös niissä syntyvät takavirrat ovat pienempiä [25]. Kuvassa 3.6 näkyvät piikidepaneelin ja ohutkalvopaneelin virta-jännite -käyrät. Kuten kuvasta nähdään, on ohutkalvopaneelin I-V -käyrä loivempi ja maksimitheopiste jää alemmalle virta- ja jännitealueelle, kuin piikidepaneelilla.



Kuva 3.6. Kiteisestä piistä valmistetun paneelin ja ohutkalvokennopaneelin I - V -käyrät [25].

Paneelivalmistaja lupaa tyypillisesti 3 %:n toleranssin valmistamiensa paneelien ulostuloteholle. Tämä toleranssi koskee ulostulotehoa, jolloin toleranssit ulostulovirralla ja -jännitteelle jäävät tätä pienemmiksi [22].

3.5 Aurinkogeneraattorin simulointimalli

Aurinkogeneraattorista rakennettiin Matlab-ohjelman avulla simulointimalli, jonka avulla edellä esitettyjä tilanteita mallinnettiin, jotta nähdään, mitkä tilanteista ovat takavirran kannalta kriittisimpiä. Generaattori mallinnettiin käyttäen NAPS Systems Oy:n 190 watin NAPS NP190GKg -paneeleita. Generaattori mitoitettiin 20 kW:n verkkovaihtosuuntaajalle, jonka maksimi DC-jännite on 1 kV. Simuloinnissa käytetyt paneelin datalehtitiedot ja lasketut sarja- ja rinnakkaisresistanssit, sekä lämpötilakerroin näkyvät taulukossa 3.1. Paneelin avoimen piirin jännitettä kuvaa U_{OC_STC} , oikosulkuvirtaa I_{SC_STC} , maksimitehopisteen tehoa P_{MPP_STC} , ulostulojännitettä U_{MPP_STC} ja ulostulovirtaa I_{MPP_STC} . Nämä kaikki arvot on annettu standarditestiolosuhteissa. A on paneelin ideaalisuuskerroin, r_s kuvaa paneelin parasiittista sarjavastusta ja r_{sh} paneelin parasiittista rinnakkaisvastusta. K_U on paneelin avoimen piirin jännitteen lämpötilakerroin, K_I paneelin oikosulkuvirran lämpötilakerroin ja K_T paneelin lämpötilan nousukerroin tietylle säteilyintensiteetille. N_s kertoo yhdessä paneelissa sarjaan kytkettyjen aurinkokennojen lukumäärän.

Taulukko 3.1. *NAPS NP190GKg -paneelin ominaisuuksia [3].*

NAPS NP190GKg	
U_{OC_STC}	33,1 V
I_{SC_STC}	8,02 A
P_{MPP_STC}	190 W
U_{MPP_STC}	25,9 V
I_{MPP_STC}	7,33 A
r_S	0,33 Ω
r_{SH}	188 Ω
A	1,30
K_U	-0,124 V/K
K_I	0,005 A/K
K_T	0,033K/W/m ²
N_S	54

Simulointimallin mitoitus aloitettiin määrittelemällä generaattorissa rinnan kytkettyjen paneeliketjujen lukumäärä neljäksi. Näin saatiin laskettua generaattorin maksimitehopisteen jännite U_{MPP_GEN} , joka on sen avoimen piirin jännite standarditestiolosuhteissa yhtälön

$$U_{MPP_GEN} = \frac{P_{MAX}}{(4 \cdot I_{MPP_STC})} = \frac{20000W}{(4 \cdot 7,33A)} = 682,13V \quad (1)$$

mukaisesti [3], missä P_{MAX} on generaattorin maksimiteho 20 kW ja I_{MPP_MAX} generaattorin suurin sallittu maksimitehopisteen virta. Näin saatu generaattorin maksimitehopisteen jännite on sama kuin yhden paneeliketjun ulostulojännite maksimitehopisteessä, joten yhteen ketjuun sarjaan kytkettyjen paneelien lukumäärä N_P saadaan yhtälöstä

$$N_P = \frac{U_{MPP_GEN}}{U_{MPP_STC}} = \frac{682,13V}{25,9V} = 26,34, \quad (2)$$

missä U_{MPP_STC} on yhden paneelin maksimitehopisteen jännite. Valitaan 26 paneelia/paneeliketju. Näin saadaan laskettua generaattorin maksimi ulostulojännite, eli generaattorin avoimen piirin jännite U_{OC_GEN} yhtälöstä

$$U_{OC_GEN} = 26 \cdot U_{OC_STC} = 860,6 V, \quad (3)$$

missä U_{OC_STC} on yhden paneelin avoimen piirin jännite STC-olosuhteissa.

Paneelin terminen jännite U_T saadaan ratkaistua yhtälön

$$U_T = \frac{N_S \cdot k \cdot T}{q} \quad (4)$$

mukaisesti, missä N_S on sarjaan kytkettyjen kennojen määrä yhdessä paneelissa, k on Boltzmannin vakio $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, T on paneelin lämpötila Kelvin-asteina, ja q elektronin varaus $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

Aurinkopaneelin simulointimallina käytettiin kuvan 2.2. yksidiodimallia, jonka mukaan paneelin ulostulovirta ja -jännite riippuvat toisistaan yhtälön

$$i_{pv} = i_{ph} - i_0 \left[\exp \left(\frac{u_{pv} + r_S i_{pv}}{A \cdot U_T} \right) - 1 \right] - \frac{u_{pv} + r_S i_{pv}}{r_{SH}} \quad (5)$$

mukaisesti, missä i_{ph} on paneelin tuottama virta, i_0 paneelin PN-liitoksen läpi kulkeva vuotovirta, u_{pv} paneelin ulostulojännite, U_T paneelin termien jännite, A ideaalisuuskerroin, r_S paneelin parasiittinen sarjavastus ja r_{SH} paneelin parasiittinen rinnakkaisvastus. Paneelin parasiittisten vastusten arvoina käytettiin jo valmiiksi ratkaistuja arvoja NAPS NP190GKg- paneelille [2] ja ideaalisuuskertoimena A käytettiin arvoa 1,30 lähteen [3] mukaisesti.

Paneelissa valosähköisen ilmiön seurauksena syntyvä virta i_{ph} riippuu auringon säteilyintensiteetistä ja saadaan ratkaistua paneelin oikosulkuvirran funktiona yhtälöstä

$$i_{ph} = (I_{SC-STC} + K_I \cdot \Delta T) \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot \left(\frac{r_{SH} + r_S}{r_{SH}} \right), \quad (6)$$

missä G on auringon säteilyintensiteetti W/m^2 , jolla simulointi suoritetaan, G_{STC} auringon säteilyintensiteetti STC-olosuhteissa, eli $1000 W/m^2$, $\Delta T = T - T_{STC}$ ja K_I paneelin oikosulkuvirran lämpötilakerroin.

Paneelin vuotovirta i_0 pn-liitoksen läpi riippuu paneelin valmistusmateriaalista, rakenteesta ja lämpötilasta ja ratkaistaan puolestaan paneelin avoimen piirin jännitteen funktiona yhtälöstä

$$i_0 = \frac{i_{ph} - (U_{OC-STC} + K_U \cdot \Delta T) / r_{SH}}{\exp \left(\frac{U_{OC-STC} + K_U \cdot \Delta T}{A \cdot U_T} \right) - 1}, \quad (7)$$

missä K_U on paneelin avoimen piirin jännitteen lämpötilakerroin. Virran ja jännitteen lämpötilakertoimet ovat paneelin datalehtiarvoja.

Paneelin lämpötilan T oletetaan riippuvan suoraan verrannollisesti auringon säteilyintensiteetistä yhtälön

$$T = T_{AMB} + K_T \cdot G \quad (8)$$

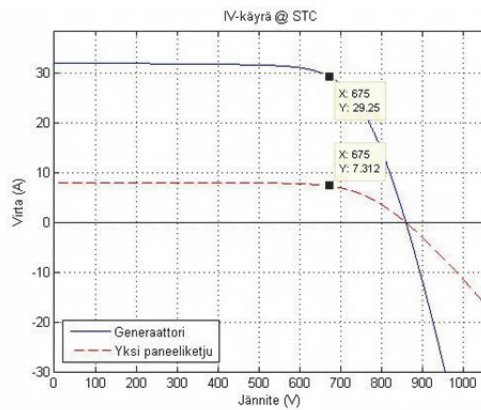
mukaan, missä T_{AMB} on ympäristön lämpötila Kelvin-astein ja K_T paneelin lämpötilan nousukerroin säteilyintensiteetille G . K_T arvioidaan paneelin NOCT-arvon perusteella. NAPS NP190GKg -paneelin NOCT, eli ominaistoimintalämpötila on $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ säteilyintensiteetin ollessa 800 W/m^2 ja ympäristön lämpötilan ollessa $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2; 5].

Simulointimallin perustana on yhden paneelin ulostulovirran ratkaiseminen. Koska paneelin ulostulovirta i_{pv} on sekä ulostulojännitteen u_{pv} että ulostulovirran itsensä funktio, ei yhtälölle ole yksiselitteistä ratkaisua, vaan yhtälö pitää ratkaista numeerisesti iteroimalla. Simuloinnissa käytettiin sekanttimenetelmää ulostulovirran yhtälön ratkaisuun. Ulostulojännitteelle annettiin arvoja $0,01$ voltin välein nollasta avoimen piirin jännitteelle asti ja ulostulovirran arvot laskettiin iteroimalla paneelin virta-jännite-käyrän muodostamiseksi. Paneelin mallista rakennettiin generaattorin malli tekemällä oma iterointisilmukka jokaiselle paneeliketjulle, jotta jokaisen paneeliketjun säteilyintensiteetti- ja lämpötila-arvoja saadaan muutettua erikseen. Matlab-tiedosto simulointimallista löytyy liitteenä tämän työn lopusta (Liite 1).

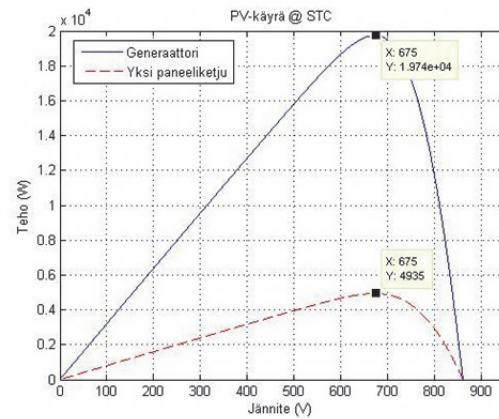
3.5.1 Simulointituloksia: Takavirran esiintyminen

Simuloinnin avulla mallinnettiin aurinkogeneraattorin toimintaa erilaisissa normaalin toiminnan aikaisissa olosuhteissa, kuten auringon säteilyn ja lämpötilan jakautuessa epätasaisesti generaattorin eri paneeliketjujen välillä, sekä esimerkiksi maasulkuvian aiheuttaman paneelien oikosulun aikana. Tarkoituksena oli tarkastella, missä tilanteissa ja miten suuria takavirtoja järjestelmässä mahdollisesti esiintyy. Oletuksena oli, että paneelien virrankeston ylittäviä takavirtoja esiintyy vain osan generaattorista olleessa oikosulussa.

Kuvassa 3.7 on simuloitu neljän paneeliketjun muodostaman generaattorin ja yhden paneeliketjun I-V-käyrät, kun kaikki paneeliketjut ovat standarditestiolosuhteissa. Nähdään, että identtisissä säteily- ja lämpötilaolosuhteissa yhden paneeliketjun ja koko generaattorin avoimen piirin jännitteet ja maksimitehopisteet ovat samat ja generaattorin oikosulkuvirta on rinnan kytkettyjen paneeliketjujen oikosulkuvirtojen summa.



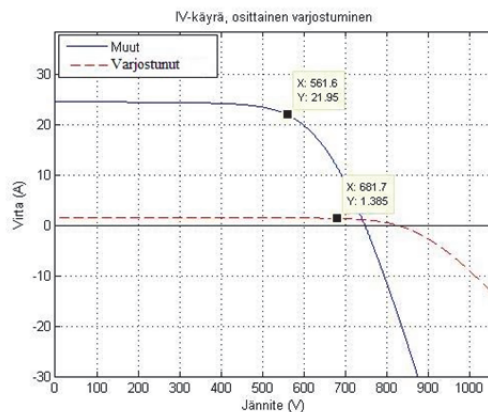
a)



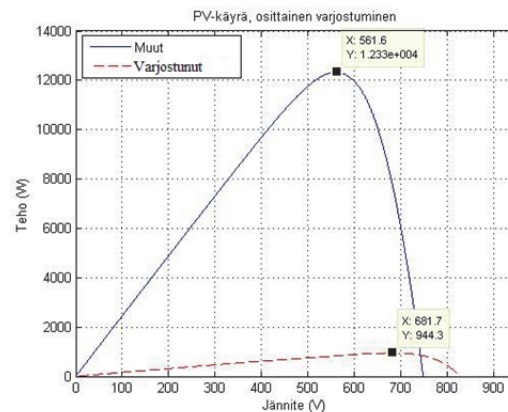
b)

Kuva 3.7. Generaattorin ja yhden paneeliketjun a) I-V- ja b) P-V -käyrät STC-olosuhteissa.

Kuvassa 3.8 on simuloitu aurinkogeneraattoria tilanteessa, jossa yksi paneeliketju on varjostunut. Tällöin se toimii matalassa säteilyintensiteetissä 200 W/m^2 [25], ja sen lämpötila on $35 \text{ }^\circ\text{C}$ [25]. Loput generaattorin paneeliketjut toimivat puolestaan 1000 W/m^2 säteilyintensiteetissä paneelien lämpötilan ollessa $60 \text{ }^\circ\text{C}$ [25]. Varjostuneen paneeliketjun avoimen piirin jännite on korkeampi, kuin generaattorin muiden paneeliketjujen avoimen piirin jännite, koska sen toimintalämpötila on matalampi. Näin ollen takavirtaa ei voi muodostua, koska varjostunut paneeliketju kykenee ylläpitämään generaattorin ulostulojännitteen kaikissa toimintapisteissä



a)

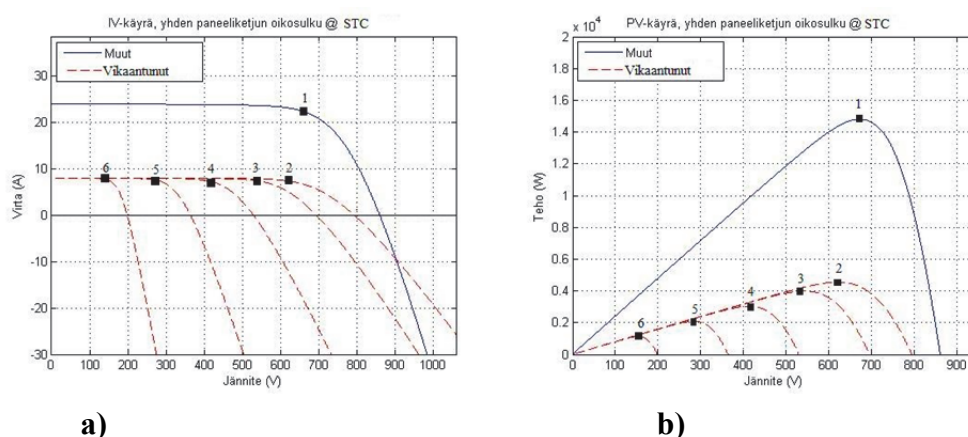


b)

Kuva 3.8. Generaattorin muiden paneeliketjujen ja varjostuneen paneeliketjuna a) I-V- ja b) P-V -käyrät.

Kuvassa 3.9 on simuloitu paneeliketjun oikosulkuutilannetta esimerkiksi maasulkuvian oikosuljettua osan yhden paneeliketjun paneeleista verrattuna koko generaattorin I-V-käyrään STC -olosuhteissa. Nähdään, että mitä enemmän paneeleita yhdessä paneeliketjussa on oikosulussa, sitä suurempi takavirta kulkee kuormaksi muuttuneen osittain oikosulussa olevan paneeliketjun läpi. Tämä johtuu osittain oikosulussa olevan paneeli-

ketjun avoimen piirin jännitteen laskemisesta suhteessa virtaa syöttävien paneeliketjujen toimintapisteen jännitteeseen. Vikaantunut paneeliketju ei kykene ylläpitämään generaattorin ulostulojännitettä, kun se ylittää vikaantuneen paneeliketjun avoimen piirin jännitteen ja näin ollen takavirta pääsee muodostumaan. Takavirta on sitä suurempi, mitä pienempi vikaantuneen paneeliketjun avoimen piirin jännite on ja mitä korkeammalla jännitteellä aurinkogeneraattorin toimintapiste on. NAPS Systems Oy ilmoittaa esimerkiksi nimellisteholtaan 200-wattisen paneelinsa Pallas 200-210G SBW- paneelinsa takavirran kestoksi 15 A [26]. Kun noin 15 prosenttia paneeliketjun paneeleista on oikosulussa, aiheutuu avoimen piirin jännitteellä noin 15 ampeerin takavirta, mikäli generaattori toimii kuvan 3.9 toimintapisteessä 1.



Kuva 3.9. Generaattorin muiden paneelien ja osittain oikosulussa olevan paneeliketjun a) I-V- ja b) P-V- käyrät STC-olosuhteissa.

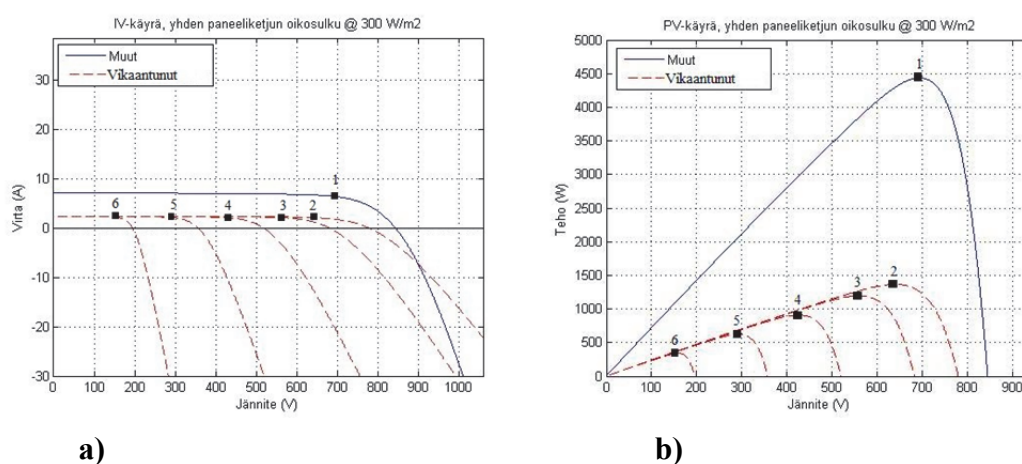
Kuviin 3.9 a) ja 3.9 b) on merkitty muiden paneeliketjujen ja vikaantuneen paneeliketjun maksimitehopisteet ja merkitty käyrät numeroin 1-6. Taulukossa 3.2 on esitetty osittain oikosulussa olevan paneeliketjun ja generaattorin muiden paneeliketjujen maksimitehopisteen jännitteet, virrat ja tehot STC-olosuhteissa, kun oikosulussa olevien paneelien määrä vikaantuneessa paneeliketjussa kasvaa.

Taulukko 3.2. Generaattorin kolmen vikaantumattoman ja yhden osittain oikosulussa olevan paneeliketjun maksimitehopisteiden tehot, jännitteet ja virrat standarditestiolo- suhteissa.

Käyrä	Paneeliketjujen lkm	Oikosulussa olevien paneelien lkm	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	P_{MPP} [kW]
1	3	-	672,90	22,00	14,81
2	1	2	620,60	7,34	4,56
3	1	5	542,20	7,34	3,99
4	1	10	415,50	7,31	3,04
5	1	15	284,70	7,33	2,09
6	1	20	155,90	7,31	1,14

Kuvassa 3.10 on simuloitu niin ikään yhden paneeliketjun osittaista oikosulkuja matalan säteilyintensiteetin aikana. Tässä simuloinnissa käytettiin säteilyintensiteettinä 300 W/m^2 ja paneelin lämpötilana $30 \text{ }^\circ\text{C}$ [25].

Matalan säteilyintensiteetin aikana generaattorin maksimitehopisteen jännite on korkeampi, mutta virta merkittävästi alempi, kuin korkean säteilyintensiteetin aikana, mikä tarkoittaa, että yhdessä paneeliketjussa voi olla useamman paneelin oikosulku, kuin korkean säteilyintensiteetin aikana ennen kuin paneelien virrankesto ylittyy. Generaattorin avoimen piirin jännitteellä noin 20 prosentin oikosulku vikaantuneessa paneeliketjussa aiheuttaa 15 ampeerin suuruisen takavirran, mikäli generaattori toimii kuvan 3.10 toimintapisteessä 1.



Kuva 3.10. Generaattorin ja osittain oikosulussa olevan paneeliketjun a) I-V- ja b) P-V-käyrät, kun auringon säteilyintensiteetti on 300 W/m^2 .

Kuviin 3.10 a) ja 3.10 b) on merkitty muiden paneeliketjujen ja vikaantuneen paneeliketjun maksimitehopisteet ja merkitty käyrät numeroin 1-6. Taulukossa 3.3 on esitetty osittain oikosulussa olevan paneeliketjun ja generaattorin muiden paneeliketjujen maksimitehopisteen jännitteet, virrat ja tehot matalan säteilyintensiteetin aikana, kun oikosulussa olevien paneelien määrä vikaantuneessa paneeliketjussa kasvaa.

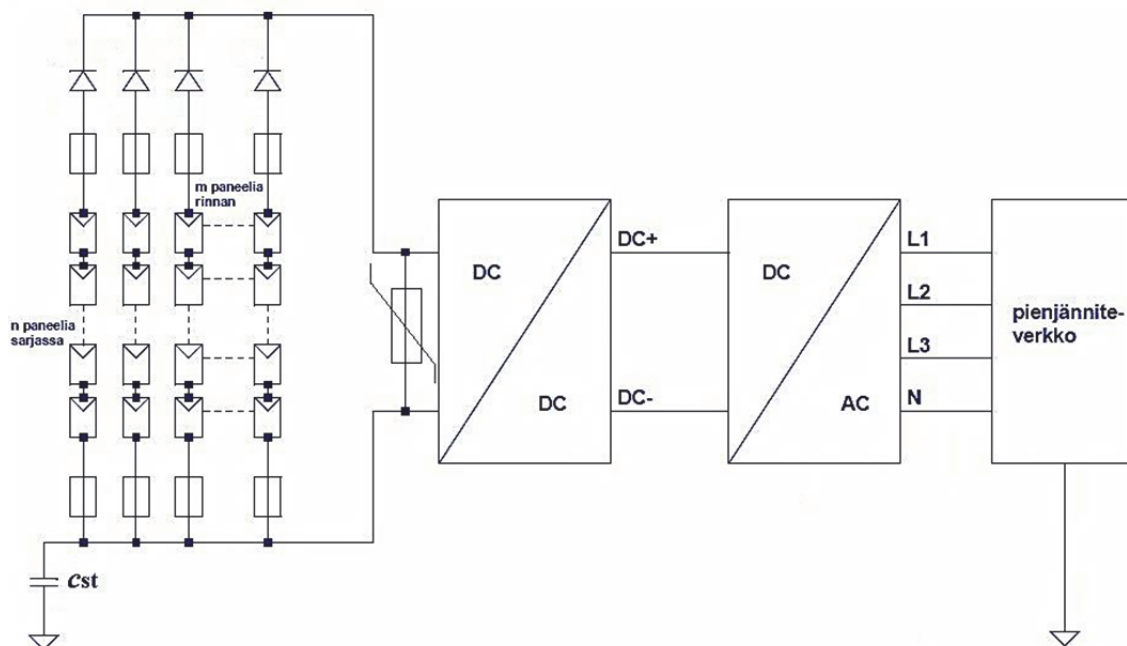
Taulukko 3.3. Generaattorin kolmen vikaantumattoman ja yhden osittain oikosulussa olevan paneeliketjun maksimitehopisteiden tehot, jännitteet ja virrat, kun auringon säteilyintensiteetti on 300 W/m^2 .

Käyrä	Paneeliketjujen lkm	Oikosulussa olevien paneelien lkm	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	P_{MPP} [kW]
1	3	-	696,80	6,37	4,44
2	1	2	640,30	2,13	1,37
3	1	5	562,00	2,13	1,20
4	1	10	427,80	2,13	0,91
5	1	15	293,40	2,13	0,63
6	1	20	160,00	2,13	0,34

Simulointitulosten perusteella nähdään, että paneelien virrankestot ylittävää takavirtaa ei esiinny käytännössä kuin paneeliketjun osittaisen tai täydellisen oikosulun aikana. Lisäksi kuvista nähdään, että aurinkogeneraattorin toimintapiste vaikuttaa esiintyvän takavirran suuruuteen. Takavirran kannalta kriittisin toimintapiste on generaattorin avoimen piirin jännite, eli kun vaihtosuuntaaja on kytkettynä irti verkosta. Kun generaattorin toimintapisteen oletetaan olevan puolestaan sen maksimitehopisteessä, jää takavirta pienemmäksi. Lisäksi säteilyintensiteetti vaikuttaa syntyvän takavirran suuruuteen siten, että mitä suurempi säteilyintensiteetti on, sitä korkeampi on generaattorin tuottama virta.

3.6 Vikavirtasuojaus aurinkosähköjärjestelmissä

Aurinkogeneraattorin vikavirtasuojaus järjestelmässä, jossa vaihtosuuntaajan sisäänmenoon on kytketty rinnakkain useita paneeliketjuja, toteutetaan tyypillisesti erityisesti aurinkosähköjärjestelmiin suunnitelluilla PV (Photovoltaic) -sulakkeilla ja sarjadiodeilla. Kuvassa 3.10 maadoittamaton pienjänniteverkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän generaattori on suojattu PV-sulakkeilla ja sarjadiodeilla. Sekä lähtö- että paluujohdin on suojattu sulakkeilla ja sarjadiodit on kytketty jokaiseen paneeliketjuun. Lisäksi ylijännitesuojana toimiva varistori voidaan kytkeä esimerkiksi kuvan 3.11 osoittamalla tavalla DC+ ja DC- -johdinten väliin.



Kuva 3.11. Keskipistemaadoitettu, galvaanisesti erottamaton pienjänniteverkkoon kytketty kolmivaihejärjestelmä, jossa vikavirtasuojaus on toteutettu PV-sulakkeilla ja sarjadiodeilla ja ylijännitesuojauksella varistorilla.

3.6.1 Sulakkeet ja sarjadiodit

Vikavirtasuojaus voidaan toteuttaa paneeliketjukohtaisilla PV-sulakkeilla. Aurinkosähköjärjestelmissä käytettävien sulakkeiden tulee täyttää standardit IEC 60269-6 (gPV) ja UL 2579 [19]. Sulakkeet ovat paneeliketjukohtaisia ja niillä suojataan erikseen sekä lähtö-, että paluujohdin. Sulakkeen toiminta perustuu sen palamiseen virran noustessa yli sulakkeen virrankeston ja näin katkaistessa virran kulun vikaantuneessa virtapiirissä. Aurinkosähköjärjestelmissä käytettävät PV-sulakkeet ovat putkisulakkeita, jotka ovat riittävän nopeita suojatakseen piiriä, jossa käytetään puolijohdekomponentteja [19].

Aurinkopaneelivalmistajat ilmoittavat tuotespesifikaatioissaan paneeliensa takavirrankeston. Käytettäessä oikosulkusuojaukseen PV-sulakkeita tulee ne mitoittaa jokaiseen järjestelmään erikseen riippuen järjestelmässä käytettyjen paneelien tehosta ja käytetystä kaapeloinnista. Sulakkeet mitoitetaan järjestelmän oikosulkuvirtaa suuremmalle virralle, sillä normaalissa toiminnassa aurinkogeneraattorin virta ei voi ylittää sen oikosulkuvirtaa.

Seuraavat aurinkosähköjärjestelmän sulakkeita ja kaapeleita koskevat mitoitusäännöt on esitetty sulakevalmistaja Cooper Bussmannin esitteessä *Photovoltaic System Overcurrent Protection* [27]. National Electric Code (NEC) määrittelee aurinkogeneraattorin kestäjän maksimivirran siten, että se on 125 % generaattorin oikosulkuvirrasta I_{SC} . Lisäksi aurinkosähköjärjestelmien kaapelointia koskevan standardin BS EN7671 (Sec 712 for Solar Photovoltaic (PV) Power Supply systems) mukaan generaattorin kaapelei-

den virrankeston tulee olla vähintään $1,25 \cdot I_{SC}$ standarditestiolosuhteissa aurinkogeneraattorin kaikissa kaapeleilla. Paneelien virrankesto on mitoitettu $2 \cdot I_{SC}$:n suuruiseksi. Jos paneeliketjuja on kaksi, on takavirta maksimissaan yhden paneeliketjun tuottaman oikosulkuvirran suuruinen. Jos paneeliketjuja on kolme, on takavirran suuruus maksimissaan $2 \cdot I_{SC}$. Sulakkeita katsotaan tarvittavan vasta kun on mahdollista, että paneelien virrankesto ylittyy. [27]

Kun generaattorissa on enemmän kuin kolme paneeliketjua rinnan kytkettynä ja ylivirtasuojasta tarvitaan, tapahtuu mitoitus siten, että johtimen ja paneeliketjun virrat mitoitetaan erikseen. Johtimen vähimmäisvirrankesto $I_{MIN} = 1,56 \cdot I_{SC}$ [27], missä I_{SC} on tässä tapauksessa yhden paneelin, eli myös yhden paneeliketjun oikosulkuvirta. Tämän perusteella valitaan johdin, jonka virrankesto on $\geq I_{MIN}$. Generaattorin, eli paneeliketjujen rinnankytkennän maksimivirta on $I_{SC_GEN} = I_{SC} \cdot N$, missä N on rinnan kytkettyjen paneeliketjujen lukumäärä generaattorissa. Aurinkogeneraattorin tuottaman takavirran maksimiarvo on $I_R = I_{SC} \cdot (N-1)$, koska suurin mahdollinen takavirta on teoreettisesti generaattorin kaikkien edelleen sähköä tuottavien paneeliketjujen tuottama virta, joka kulkee yhden täysin varjostuneen tai oikosulkeutuneen paneeliketjun kautta, eli sähköä tuottavia paneeliketjuja on tällöin generaattorissa $N-1$ kappaletta. Aurinkogeneraattoria suojaavat sulakkeet valitaan näiden virtojen perusteella siten, että paneeliketjujen kaapeloinnin virrankesto ei saa ylittyä. Eli mikäli $I_R > I_{MIN}$, valitaan sulakekoko kaapelin minimivirrankeston perusteella siten että valitaan virrankestoaltaan lähinnä tätä oleva sulake siten että valitaan virrankestoaltaan seuraava sulakekoko ylöspäin. [27]

Generaattorin ollessa oikosulussa ei takavirtaa voi syntyä. Kuten edellä esiteltyjen aurinkosähköjärjestelmien vikatilanteiden kohdalla todettiin, esiintyy generaattorissa suurin takavirta generaattorin toimiessa avoimen piirin jännitteellä osan generaattorista ollessa oikosulussa. Tällä jännitteellä syntyvä takavirta jää käytännössä usein alle sulakkeen virrankeston johtuen vaihtelevista säteilyolosuhteista [21], koska aurinkogeneraattorin ulostulovirta on suoraan verrannollinen auringon säteilyintensiteettiin. Matalan säteilyintensiteetin aikana takavirta ei välttämättä ylitä kaapeleiden tai paneelien virrankestoja, eikä näin ollen polta sulakkeita. Tällöin järjestelmässä piilevä vika jää huomaamatta.

Esimerkkinä laitteiston vikaantumisen pitkän ajan kuluessa ovat PV-sulakkeilla suojatun järjestelmän sulakkeiden rikkoutuminen jatkuvan lämpötila-, jännite- ja virtakuormituksen takia. Generaattorin toimintavirrat ja -jännitteet ovat korkeita ja sulakkeet altistuvat näin koko ajan voimakkaasti vaihteleville lämpötiloille ja virroille. On mahdollista, että tämä kuormittaa sulakkeita niin, että ne vikaantuessaan aiheuttavat itse valokaarioikosulun järjestelmässä. Myös paneeliketjujen kytkentärasian liitinten voimakas lämpeneminen suurten toimintavirtojen takia voi aiheuttaa valokaarioikosulun niiden vikaantuessa liian lämpenemisen johdosta. Myös paneelien valmistusvirheet ja niistä johtuva kasvanut riski oikosulkuun paneelissa voivat tulla kyseeseen mietittäessä mah-

dollisia vikatilanteita. Järjestelmässä palaneiden sulakkeiden osalta jääkin yleensä ratkaisemattomaksi kysymykseksi, aiheuttiko sulakkeen palamisen vikavirta, vai sulakkeen itsensä rikkoutuminen. [19]

Takavirralla voidaan suojautua myös sarjadiodeilla, jotka on kytketty sarjaan paneeliketjun kanssa, kuten kuvassa 3.11. Sarjadiodi ei kuitenkaan ole varsinainen ylivirtasuojaja, vaan se estää takavirran kulkemisen paneeliketjussa. Sarjadiodit mitoitetetaan siten, että niiden estosuuntaisen jännitteenkeston tulee olla IEC 60364-7-712 -standardin mukaan vähintään kaksi kertaa suojattavan paneeliketjun avoimen piirin jännite standarditestiolosuhteissa [28].

4 ELEKTRONINEN SULAKE AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄSSÄ

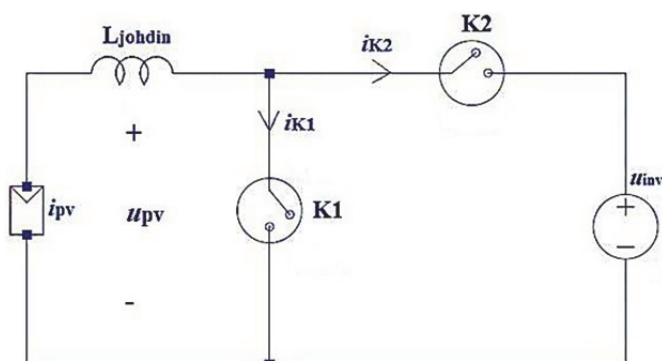
Elektronisen sulakkeen toiminta aurinkosähköjärjestelmässä tässä työssä esitettynä toteutuksena perustuu mahdollisuuteen kytkeä aurinkogeneraattori oikosulkuun sen vakiovirtalähdeluonteen takia. Vakiovirtalähteellä jännite-ero sen napojen välillä ei vaikuta sen ulostulovirtaan ja lähteen kanssa rinnan kytketty sisäinen resistanssi on ideaalisessa tapauksessa ääretön. Käytännössä ideaalista virtalähdettä ei kuitenkaan ole. Puolijohdekomponenteista rakennettu aurinkogeneraattori on epälineaarinen ja epäideaalinen virtalähde johtuen sen puolijohdeominaisuuksista. Aurinkogeneraattoria voidaan sen toimiessa vakiovirta-alueella pitää kuitenkin vakiovirtalähteenä [4]. Vakiovirtalähde toimii siten, että se pyrkii pitämään virran vakiona kuorman läpi kuorman impedanssin muuttuessa. Jännitelähde toimii puolestaan siten, että se pyrkii pitämään jännitteen kuorman yli vakiona, mikä johtaa kuormavirran nousemiseen kuormaimpedanssin pienentyessä. Jännitelähteen tapauksessa piirin vikavirtasuojaus perustuu piirin komponenttien ja kaapeloinnin suojaamiseen kasvavalta oikosulkuvirralla.

Elektronisen sulakkeen toiminta takavirran estämiseksi perustuu aurinkogeneraattorin toimintajännitteen laskemiseen tai aurinkogeneraattorin ulostulonapojen oikosulkemiseen takavirran kulkemisen lopettamiseksi. Kun virranmittausten perusteella jossain generaattorin paneeliketjuista havaitaan takavirta, voidaan sen kulkemista yrittää estää aluksi laskemalla järjestelmän toimintajännitettä. Takavirta loppuu, mikäli järjestelmän toimintajännite on korkeintaan vikaantuneen paneeliketjun avoimen piirin jännitteen suuruinen, eli kuvassa 3.1 esitetty generaattorin ja vikaantuneen paneeliketjun avoimen piirin jännitteiden välinen ero $\Delta U_{OC} = 0$. Mikäli toimintapisteen jännitteen alentaminen siten, että tehon syöttäminen verkkoon voi edelleen jatkua riittä, oikosuljetaan aurinkogeneraattorin ulostulonavat. Tällöin generaattorin ulostulojännite on 0 V. Koska jokaisen paneeliketjun ulostulojännite on 0 V, generaattorissa ei voi kulkea takavirtaa. Maavikavirralla suojautumiseen käytetään puolestaan DC-syötön katkaiseva kytkintä. Elektroninen sulake eroaa toiminnallisesti PV-sulakkeilla ja sarjadiodeilla toteutettavasta passiivisesta vikavirtasuojauksesta siten, että se toimii mittausten perusteella. Elektronista sulakepiiriä voidaan näin ollen nimittää myös aktiiviseksi vikavirtasuojaksi.

4.1 Elektronisen sulakkeen toteutustapoja

Elektronisella sulakkeella voidaan korvata PV-sulakkeet ja lisäksi sen avulla voidaan katkaista vaihtosuuntaajan syöttö maavikavirtatilanteessa. PV-sulakkeita vastaava toi-

minnallisuus voidaan toteuttaa kuvan 4.1 mukaisesti oikosulkukytkimellä ja sarjakytkimellä. Vaihtosuuntaajan syöttö katkaistaan sarjakytkimellä (K2), mikäli järjestelmässä havaitaan maavikavirta tai takavirta. Rinnakkaiskytkimellä (K1) generaattorin ulostulonavat puolestaan voidaan oikosulkea, jolloin takavirran kulkeminen generaattorin osassa loppuu. Tällöin sen ulostulonapojen välillä kulkee aurinkogeneraattorin oikosulkuvirta rinnakkaiskytkimen kautta. Tässä kappaleessa tarkastellaan elektronisen sulakkeen mahdollisia toteutustapoja DC-puolelta suurtaajuusmuuntajalla galvaanisesti erotetun ja galvaanisesti erottamattoman järjestelmän, ja lisäksi maadoitetun ja maadoittamattoman generaattorin tapauksessa. Kytkimet oletetaan aluksi häviöttömiksi, eikä kytkinten fyysiseen toteutukseen komponenttitasolla oteta kantaa. Oikosulkukytkin on normaalisti auki ja sarjakytkin normaalisti johtava. Lisäksi oletetaan, että virran ja jännitteen mittaukset ovat mahdollisia kaikista pisteistä.



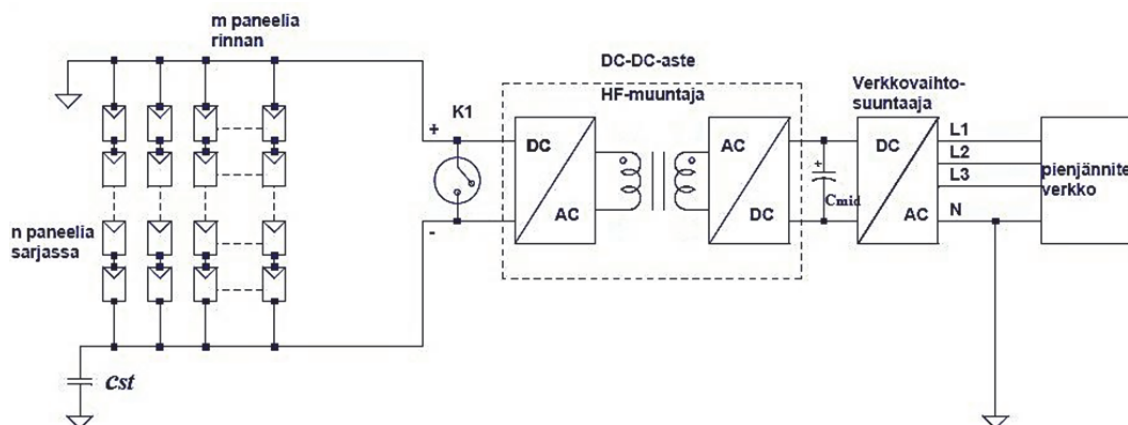
Kuva 4.1. Järjestelmään integroitava elektroninen sulakepiiri.

Jotta rinnakkais- ja sarjakytkimillä toteutettu elektroninen sulake toteuttaa sille asetetut vaatimukset, tulee kytkinten sijoittua piirissä siten, että maavikavirtatilanteessa vaihtosuuntaajan syötön tulee olla aina katkaistavissa. Toisaalta generaattori voidaan kytkeä oikosulkuun vasta, kun sarjakytkin on avattu. Näin ollen sarjakytkimen K2 on sijoitettava rinnakkaiskytkimellä K1 muodostettavan oikosulkupiirin ulkopuolelle kuvan 4.1 mukaisesti. Rinnakkaiskytkintä ja sarjakytkintä ohjataan erillisillä signaaleilla. Kuvasta 4.1 poiketen sarjakytkimiä voi olla kaksi kappaletta, toinen positiivisessa ja toinen negatiivisessa DC-johtimessa. Mikäli syötön kakaisemiseen tarvitaan useampia kuin yksi sarjakytkin, ohjataan sarjakytkimiä siten, että ne ovat kaikki yhtä aikaa johtavia tai johtamattomia.

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan erilaisia toteutusmahdollisuuksia elektroniselle sulakkeelle. Osa pohdituista toteutuksista todetaan kuitenkin käytännössä toteutuskelvottomiksi. Kappaleen 4.1.1 lopussa esitellään yksi toimiva ratkaisu galvaanisesti erotettuun järjestelmään ja kappaleessa 4.1.2 galvaanisesti erottamattomaan järjestelmään integroitavaksi.

4.1.1 Galvaanisesti erotettu järjestelmä

DC-puolelta suurtaajuusmuuntajalla galvaanisesti erotetussa järjestelmässä elektronisen sulakkeen toiminnallisuus on mahdollista toteuttaa yhdellä DC+ - ja DC- -napojen välillä olevalla rinnakkaiskytkimellä ilman sarjakytkintä, koska galvaanisesti erotetussa järjestelmässä ei maavikavirta voi erotusmuuntajan ansiosta kulkea verkon kautta. Rinnakkaiskytkin voi olla erilliskomponentti, kuten kuvassa 4.2. olevassa järjestelmässä, ja sijoitettu vaihtosuuntaajan DC-DC -asteen sisäänmenoon.



Kuva 4.2. Galvaanisesti suurtaajuusmuuntajalla erotettu kolmivaihejärjestelmä, jossa elektroninen sulake on toteutettu yhdellä erillisellä rinnakkaiskytkimellä.

Mikäli rinnakkaiskytkin sijoitettaisiin vaihtoehtoisesti DC-DC -asteen ulostuloon välipiirin kondensaattorin C_{mid} rinnalle, muodostuisi kytkimen sulkemishetkellä suuri virtapiikki kondensaattorin varauksen purkautuessa kytkimen kautta. Näin ollen tällainen toteutus ei ole käytännössä mahdollinen.

Kun rinnakkaiskytkin K1 sijoitetaan DC-DC-asteen sisäänmenoon, jänniterasitus sen yli on aurinkogeneraattorin ulostulojännitteen suuruinen. Näin ollen jänniterasitus kytkimen K1 yli on maksimissaan generaattorin avoimen piirin jännitteen U_{OC} suuruinen. Kytkettäessä K1 johtavaksi sen läpi kulkeva virta on generaattorin oikosulkuvirta I_{SC} .

Oikosulkupiiri voidaan muodostaa erillisen rinnakkaiskytkimen sijasta myös DC-DC-asteen kytkimellä. DC-DC-asteista Boost ja Full Bridge on esitelty kappaleessa 2.3.2 kuvissa 2.11 ja 2.12. Tällainen toteutustapa on mahdollinen, koska DC-DC-asteen kytkin tai kytkimet on mitoitettu kestäämään järjestelmän maksimijännite, eli generaattorin avoimen piirin jännite U_{OC} ja generaattorin oikosulkuvirta I_{SC} . Käytettäessä DC-DC-asteen kytkintä elektronisen sulakkeen rinnakkaiskytkimenä vältetään erillisen komponentin lisäämiseltä järjestelmään. DC-DC-asteista oikosulkupiirin muodostamiseen soveltuvat sellaiset ratkaisut, joissa on rinnakkaiskytkin puolijohdekytkin DC+- ja DC- -johdinten välissä, kuten Boost-hakkuri.

4.1.2 Galvaanisesti erottamaton järjestelmä

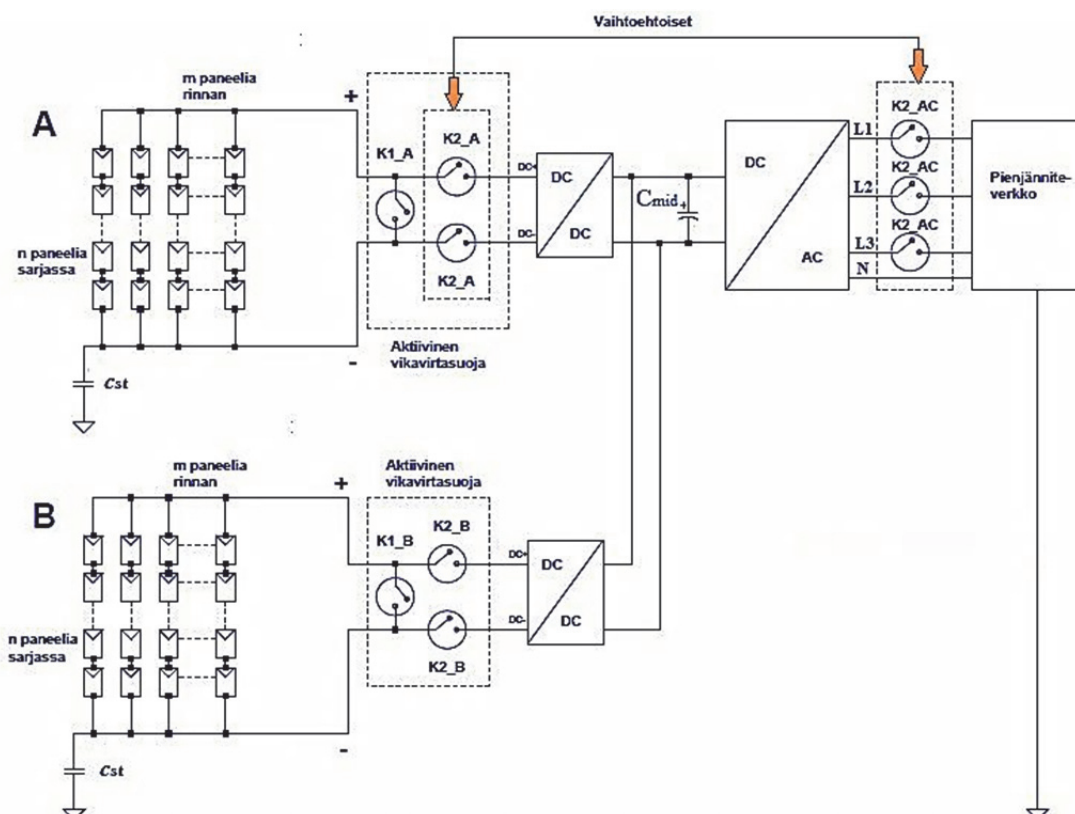
Galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä oikosulkupiiri voidaan toteuttaa galvaanisesti erotetun piirin tapaan yhdellä erillisellä rinnakkaiskytkimellä, joka voi sijoitua, samoin kuin kuvassa 4.2, DC-DC -asteen sisäänmenoon. Galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä jakeluverkon ja vaihtosuuntaajan syötön välissä ei ole muuntajaa, joten maavikavirran on mahdollista kulkea verkon kautta. Käytettäessä kaksitasoista DC-jännitettä, on maavikavirralla kaksi virtatietä. Toinen virtatie kulkee generaattorilta DC+ -johtimen ja verkon, ja toinen DC- -johtimen ja verkon kautta maihin. Näin ollen, jotta molemmat virtatiet saadaan katkaistua, sijoitetaan sarjakytkimet sekä DC+ - että DC- -johtimeen. Näin ollen galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä elektroninen sulake tulee toteuttaa sekä rinnakkais- että sarjakytkimillä.

Oikosulkukytkeytymisen osalta jännite- ja virtaräsitukset ovat myös galvaanisesti erottamattoman järjestelmän tapauksessa samat, mikäli käytetään DC-välipiirin sisäänmenoon kytkettävää erilliskomponentilla toteutettavaa kytkintä. Myös Boost-hakurin kytkintä voidaan käyttää oikosulkukytkeytymisenä. Sen sijaan sarjakytkimiä tarvitaan kaksi, joita kumpaakin ohjataan samalla signaalilla synkronisesti siten, että molemmat kytkimet ovat joko yhtä aikaa johtavia tai johtamattomia. Yhden sarjakytkimen jänniteräsitys on $\frac{u_{DC}}{2}$.

Eräs mahdollisuus toteuttaa virtapiirin katkaisu on käyttää sarjakytkimiä vaihtosuuntaajan jokaisessa ulostulovaiheessa, jolloin sarjakytkiminä toimivat esimerkiksi verkkoreleet. Tällöin oikosulkupiiri voidaan muodostaa myös vaihtosuuntaajan kytkinsillan kautta. Käytettäessä vaihtosuuntaajan kytkinsillan kytkimiä oikosulkupiirin muodostamisessa vältetään jälleen erillisen rinnakkaiskytkimen lisäämiseltä järjestelmään, sillä vaihtosuuntaajan kytkimet on mitoitettu kestämään järjestelmän maksimivirta ja -jännite. Tällöin sarjakytkimet on sijoitettava vaihtosuuntaajan ulostuloon yksi kytkin jokaiseen vaihejohtimeen. Sarjakytkimiä ohjataan synkronisesti samalla signaalilla, eli kaikki kytkimet ovat yhtä aikaa johtavia tai johtamattomia. Tällöin lisäksi ennen oikosulkupiirin muodostamista DC-välipiirin kondensaattorin varaus on purettava, jotta DC-välipiiriä ei oikosuljeta.

Kuvassa 4.3 on esitetty rinnakkain kaksi mahdollista tapaa toteuttaa elektroninen sulake. Kuvassa 4.3 nähdään katkoviivalla ympäröitynä elektronisen sulakkeen sijoittuminen aurinkosähköjärjestelmään. Elektroninen sulake on nimetty kuvassa aktiiviseksi vikavirtasuojaksi. Aurinkogeneraattori on jaettu A- ja B-osaan, joista kummallakin on erilliset DC-DC -asteet, jotka on kytketty yhteen verkkovaihtosuuntaajaan. Vaihtoehtoisena toteutuksena DC-johtimiin sijoitetuille sarjakytkimille (kuvassa K2_A ja K2_B) toimivat verkkoreleet (kuvassa K2_AC). Kuten kuvan perusteella voidaan havaita, katkeaa sekä A- että B-generaattorin syöttö jakeluverkkoon, kun verkkoreleet avataan. Sen sijaan DC-kytkimillä toteutetun menetelmän etu verkkoreleillä toteutettuun nähden on se, että

mikäli aktiivisen vikavirtasuojan käyttämistä edeltävä vika esiintyy vain toisessa osassa generaattoria, voidaan vain se erottaa jakeluverkosta toisen osan jatkaessa edelleen tehon syöttämistä verkkoon.



Kuva 4.3. Galvaanisesti erottamaton kolmivaihejärjestelmä, jossa elektronisen sulakkeen oikosulkupiiri on muodostettu DC-DC -asteella ja sarjakytkimet on sijoitettu DC+ - ja DC- -johtimeen.

4.2 Elektronisen sulakkeen toiminta eri vikatilanteissa

Vikatilanteita tarkasteltaessa oletetaan, että generaattorin jonkin paneeliketjun avoimen piirin jännite on suhteessa generaattorin toimintapisteen ulostulojännitteeseen niin voimakkaasti alentunut, että järjestelmän toimintajännitettä ei pystytä alentamaan riittävästi takavirran estämiseksi siten, että vaihtosuuntaaja voisi edelleen jatkaa tehon syöttämistä verkkoon.

Taulukossa 4.1. on yhteenveto rinnakkais- ja sarjakytkinten kytkemisestä galvaanisesti erotetun ja erottamattoman järjestelmän tapauksessa takavirran ja maavikavirran esiintyessä. Kuten taulukosta nähdään, avataan sarjakytkin siis kaikissa vikatilanteissa.

Taulukko 4.1. Yhteenveto elektronisen sulakkeen kytkinten kytkemisestä erilaisissa vikatilanteissa.

	Elektroninen sulake			
	Rinnakkaiskytkin K1		Sarjakytkin K2	
	Kiinni	Auki	Kiinni	Auki
Galvaanisesti erotettu järjestelmä				
Takavirta	X			X
Galvaanisesti erottamaton järjestelmä				
Takavirta	X			X
Maavikavirta		X		X

Kuten vikavirtoja käsittelevässä luvussa 3 todettiin, takavirran kulkeminen aurinkogeneraattorissa edellyttää käytännössä aina generaattorin vikaantumista. Galvaanisesti erotetussa järjestelmässä takavirran muodostumiseen riittää yksi maasulkuvika, jos aurinkogeneraattori on maadoitettu. Mikäli vikavirtamittauksen perusteella havaitaan järjestelmässä vikavirta, aukeaa kytkin K2 automaattisesti. Tällöin vaihtosuuntaaja on kytketty irti verkosta ja aurinkogeneraattori toimii avoimen piirin jännitteellä. Tämä puolestaan, riippuen maasulkuvian paikasta generaattorissa ja säteily- ja lämpötilaolosuhteista, saattaa aiheuttaa takavirran kulkemisen osittain oikosuljetussa generaattorissa. Mikäli mittauksen perusteella generaattorin osassa havaitaan korkea takavirta, kytkin K1 suljetaan. Tällöin generaattorin ulostulojännite on 0 V ja takavirran kulkeminen generaattorin osassa loppuu.

Galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä yksittäinen eristysvika aurinkogeneraattorissa ei johda takavirran muodostumiseen, kuten kappaleessa 3.1 todettiin. Yksittäinen eristysvika sen sijaan aiheuttaa maavikavirran kulkemisen aurinkogeneraattorissa. Maavikavirran esiintyessä tehon syöttämisen verkkoon tulee katketa automaattisesti. Tällöin sarjakytkin K2 avataan kytkimen K1 ollessa niin ikään auki. Kaksoismaasulkuvika aiheuttaa sekä maavikavirran, että mahdollistaa takavirran muodostumisen. Kun kytkin K2 avataan, toimii aurinkogeneraattori avoimen piirin jännitteellä. Tällöin takavirta osittain oikosuljetussa generaattorissa voi nousta korkeaksi riippuen maasulkujen paikoista ja säteily- ja lämpötilaolosuhteista. Jos takavirran mittauksen perusteella havaitaan korkea takavirta generaattorin osassa, suljetaan kytkin K1, jolloin generaattorin ulostulonapojen välinen jännite on 0 V ja takavirran kulkeminen generaattorin osassa loppuu.

Taulukossa 4.2. verrataan elektronisen sulakkeen toimintaa PV-sulakkeilla ja sarjadiodeilla toteutettuun vikavirtasuojaukseen. Tarkastellaan galvaanisesti erotettua ja erottamatonta järjestelmää erikseen, kuten taulukossa 4.1. Todetaan, että PV-sulakkeilla toteutettu vikavirtasuojaus toimii vain sulakkeen virrankeston ylittävillä virroilla. Näin ollen PV-sulakkeilla voidaan teoriassa suojautua takavirran lisäksi myös maavikavirral-

ta, joskin se edellyttää maavikavirran nousemista niin korkeaksi, että sulakkeen virrankesto ylittyy. Sarjadiodi puolestaan estää takavirran kulkemisen paneeliketjussa. Voidaan siis todeta, että elektroninen sulake lisää järjestelmän käyttäjien turvallisuutta katkaistessaan maavikavirran, verrattuna PV-sulakkeilla ja sarjadiodeilla toteutettuun vikavirtasuojaukseen.

Taulukko 4.2. Aurinkosähköjärjestelmän vikavirtasuojaus eri menetelmin.

	Elektroninen sulake	PV-sulake	Sarjadiodi
Galvaanisesti erotettu järjestelmä			
Takavirta	X	(X)	X
Galvaanisesti erottamaton järjestelmä			
Takavirta	X	(X)	X
Maavikavirta	X	(X)	-

4.3 Elektronisen sulakkeen kytkimet

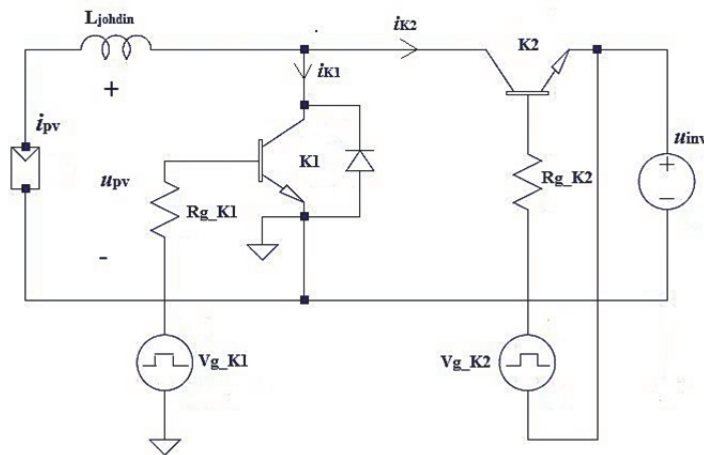
Sarjakytin K2 on normaalisti johtava kytkin, joka avataan, kun järjestelmässä ilmenee vikavirta, jonka perusteella vaihtosuuntaaja on kytkettävä irti jakeluverkosta. Sarjakytimen käytännön toteutuksessa kytkimen jännitehäviöistä on otettava huomioon sen johtavuustilan häviöt, joihin vaikuttaa kytkimen läpi kulkevan virran suuruus. Toinen komponenttitason toteutuksessa huomioitava asia on induktiivinen kytkeminen. Kun virtapiiri katkaistaan virrallisena, muodostuu johtimen hajainduktanssiin jännite, joka on sitä suurempi, mitä suurempi on virran muutos ajan suhteen. Yhtälön (9) mukaisesti muodostuvaa jännitettä tulee rajoittaa, jotta kytkinkomponentin jännitteenkesto ei ylitä. Kun K2 avataan, muodostuu johtimen hajainduktanssiin L_{johdin} jännite, joka on suuruudeltaan

$$U_L = L_{johdin} \cdot \frac{di_{K2}}{dt}. \quad (9)$$

Rinnakkaiskytkin K1 on normaalisti auki oleva kytkin, joka ohjataan johtavaksi, kun järjestelmässä havaitaan niin suuri takavirta, että sitä ei saada toimintapisteeseen jännitettä alentamalla loppumaan siten, että vaihtosuuntaaja voisi jatkaa edelleen toimintaansa. Rinnakkaiskytkin voidaan toteuttaa ilman erillistä piiriin lisättävää komponenttia, kuten kappaleissa 4.1.1 ja 4.1.2 todettiin käyttämällä oikosulkupiirin muodostamiseen DC-DC-asteen kytkintä. Rinnakkaiskytkin sijoittuu piirissä DC+ - ja DC- -johdinten väliin. Rinnakkaiskytkimen sulkemishetken jännite, ja piirissä oleva kapasitanssi vaikuttavat kytkentähetkellä syntyvän virtapiikin suuruuteen yhtälön

$$i_C = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (10)$$

mukaisesti. Kuvassa 4.4 elektronisen sulakkeen kytkimet K1 ja K2 on toteutettu IGBT-komponenteilla, joita ohjataan toisistaan riippumattomilla hilapulsseilla, joita kuvassa on merkitty V_{g_K1} :lla ja V_{g_K2} :lla. R_{g_K1} ja R_{g_K2} ovat rinnakkaiskytkimen ja sarjakytkimen hilavastukset. Rinnakkaiskytkimellä oleva vastarinnankytketty diodi estää virran kulkemisen emitteriltä kollektorille kytkimen läpi. Rinnakkaiskytkimen läpi kulkevaa virtaa merkitään i_{K1} :lla ja sarjakytkimen läpi kulkevaa virtaa i_{K2} :lla.



Kuva 4.4. Elektroninen sulake, jossa kytkimet K1 ja K2 on toteutettu IGBT-kytkinkomponenteilla.

4.3.1 Kytkimien ohjaus ja clamping-piirit

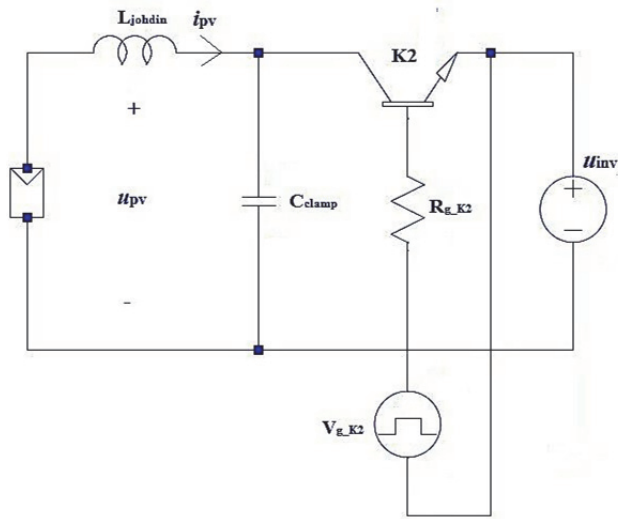
Puolijohdekytkimen ohjainpiirin tehtävänä on mittaussignaalien perusteella antaa kytkimelle ohjaussignaali, joka ohjaa kytkimen johtavaksi tai johtamattomaksi. Kytkimen ajuripiiri toimii puolestaan ohjauspiirin ja puolijohdekytkimen välillä. Se vahvistaa ohjauspiirin signaalit puolijohdekytkimen tarvitsemalle tasolle, jotta kytkintä voidaan ohjata. Lisäksi se toimii tarvittaessa galvaanisena erotuksena ohjainpiirin ja kytkimen välillä. Ajuripiirin tehtävänä on lisäksi kytkeä kytkintä siten, että sen virran ja jännitteen suurimmat sallitut nousunopeudet eivät ylitä ja että kytkimen kytkentäajat ovat sovelukseen sopivat ja estää kytkimen tilan vaihtuminen esimerkiksi sähkömagneettisten häiriöiden takia. [25]

Sarjakytkintä avattaessa muodostuvaa jännitepiikkiä voidaan rajoittaa niin sanotun clamping-piirin avulla. Clamping voidaan toteuttaa passiivikomponenttien avulla käyttämällä kytkimen läheisyydessä riittävän suurta piiriin rinnan kytkettyä kondensaattoria, joka rajoittaa katkaisuhetkellä nousevaa jännitepiikkiä. Käytettävän clamping-kondensaattorin koko voidaan määritellä yhtälön

$$\frac{1}{2} \cdot C_{clamp} \cdot u_{inv}^2 = \frac{1}{2} \cdot L_{johdin} \cdot i_{pv}^2 \quad (11)$$

$$\rightarrow C_{clamp} = \frac{L_{johdin} \cdot i_{pv}^2}{u_{inv}^2} \quad (12)$$

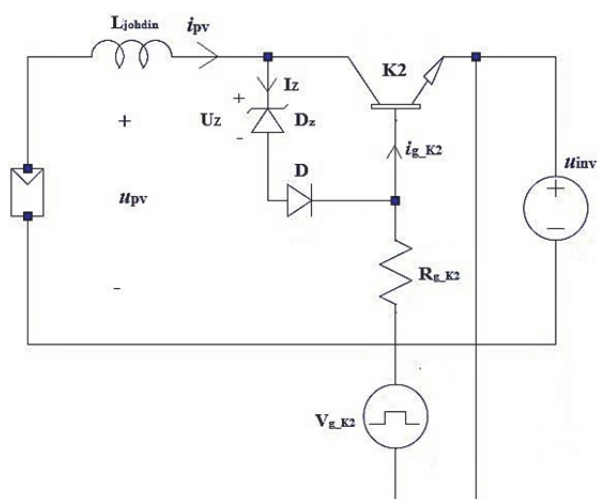
avulla, missä C_{clamp} on clamping-kondensaattorin arvo, u_{inv} vaihtosuuntaajan toimintajännite, L_{johdin} johtimen induktanssi ja i_{pv} piirissä kulkeva virta, kun kytkin K2 avataan. Kuvassa 4.5 kytkentähetken jännitepiikin rajoittaminen on tehty piiriin DC+- ja DC- -johtimien väliin kytketyllä kondensaattorilla.



Kuva 4.5. Kondensaattorilla toteutettu passiivinen clamping.

Kuvassa 4.6 on kytkin K2, joka oletetaan tässä puolijohdekytkimeksi, esimerkiksi IGBT:ksi ja kytkimen K2 kannalle kytketystä active clamping -piiristä. Kun kytkin johtaa, virta kulkee johtimen induktanssia kuvaavan kelan L_{johdin} läpi kytkimen kollektorilta emitterille. R_{g_K2} kuvaa kytkimen hilavastusta.

Diodit D_Z ja D toimivat siten, että zener-diodi D_Z alkaa johtaa johtimeen muodostuneen jännitteen noustessa sen zener-jännitteen U_Z suuruiseksi. Tällöin diodien yli oleva jännite, kuten myös puolijohdekytkimen K2 hila-kollektori -jännite on suuruudeltaan zener-jännitteen suuruinen. Myös diodi D johtaa ja diodien läpi kulkeva virta I_Z kulkee kytkimen K2 hilalle. Hilavirran i_{g_K2} nousu hidastaa IGBT:n ohjautumista johtamattomaksi.



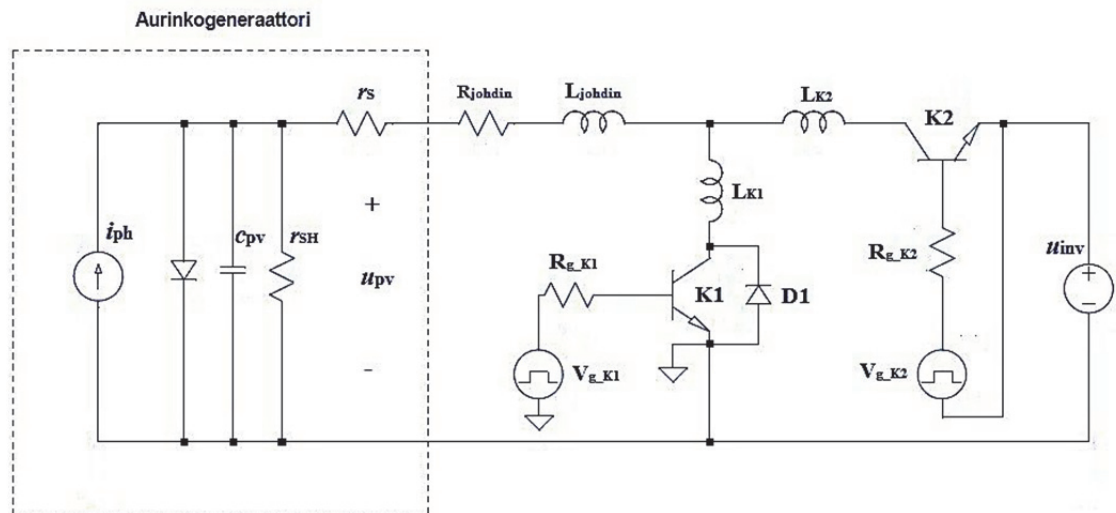
Kuva 4.6. Puolijohdekytkimellä toteutettu sarjakytkin K2 ja active clamping -piiri [29].

Koska elektroninen sulake koostuu rinnakkais- ja sarjakytkimistä, passiivisen jännite-clampin käyttäminen ei ole mahdollista, sillä rinnakkaiskytkimen sulkeminen suuren kapasitanssin läheisyydessä aiheuttaa suuren virtapiikin kondensaattorin varauksen purkautuessa kytkimen kautta. Koska lisäksi oikosulkupiiri muodostetaan käytännössä tilanteessa, jossa sarjakytkin on avattu ja aurinkogeneraattori näin ollen toimii avoimen piirin jännitteellä, piirin DC-jännite on suurimmillaan. Täten ainoaksi mahdollisuudeksi toteuttaa elektroninen sulake jää sijoittaa sarjakytkin DC-välipiirin kondensaattorin ja rinnakkaiskytkimen väliin, jolloin välipiirin kondensaattori erotetaan piiristä avaamalla sarjakytkin ennen kuin oikosulkupiiri muodostetaan.

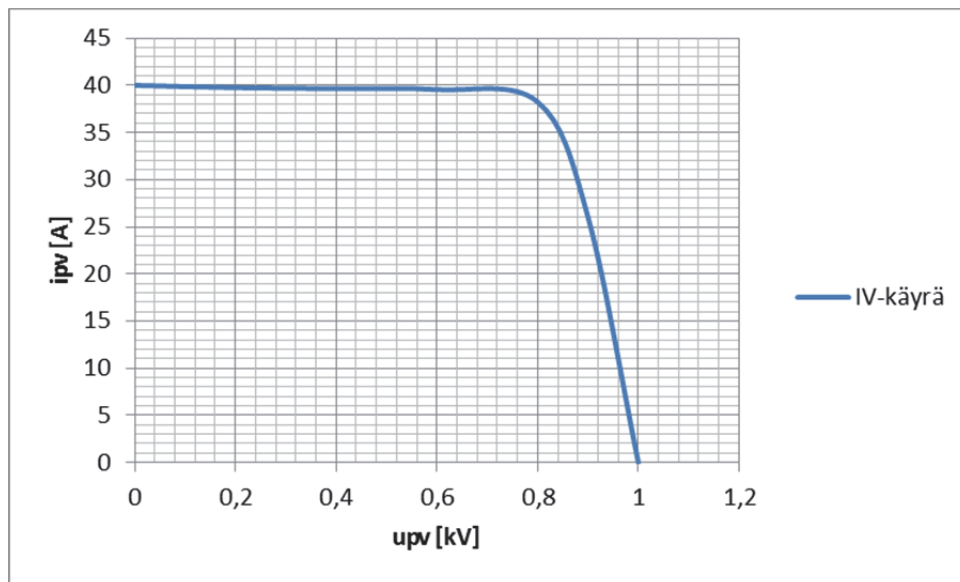
4.4 Elektronisen sulakkeen simulointimalli

Simplorer-simulointiohjelmalla luotiin aluksi kuvassa 2.2 esitettyyn yksidiodimalliin perustuva aurinkogeneraattorin malli, joka näkyy katkoviivalla ympäröitynä kuvassa 4.7. Elektronisen sulakkeen simuloinnissa käytettävän Aurinkogeneraattorin avoimen piirin jännite on 1 kV ja oikosulkuvirta 40 A. Mallin I-V -käyrä on esitetty kuvassa 4.8. Simulointipisteiden ulostulojännitteet valittiin siten, että neljä pisteistä sijoittuu generaattorin I-V -käyrällä sen vakiovirta-alueelle ja yksi piste vakiojännitealueelle. Ulostuloteho kussakin simulointipisteessä laskettiin. Simulointipisteiden ulostulojännitteet, -virrat ja -tehot näkyvät taulukosta 4.3.

Elektronisen sulakkeen simulointimalli toteutettiin Simplorer-simulointiohjelmalla. Simuloitava piiri näkyy kuvassa 4.7. Rinnakkais- ja sarjakytkiminä käytettiin IGBT-kytkimiä, joita ohjattiin hilalle kytketyllä ajastetulla pulssilähteillä, joita merkitään kuvassa V_{g_K1} :lla ja V_{g_K2} :lla. Simulointimallin lähtökohdaksi otettiin rinnakkaiskytkimen toteuttaminen erilliskomponenteilla. Simulointimallissa käytettiin IGBT:n mallia, joka sisältää IGBT:n parasiittiset ominaisuudet, kuten sisäiset kapasitanssit.



Kuva 4.7. Elektronisen sulakkeen simulointimalli.



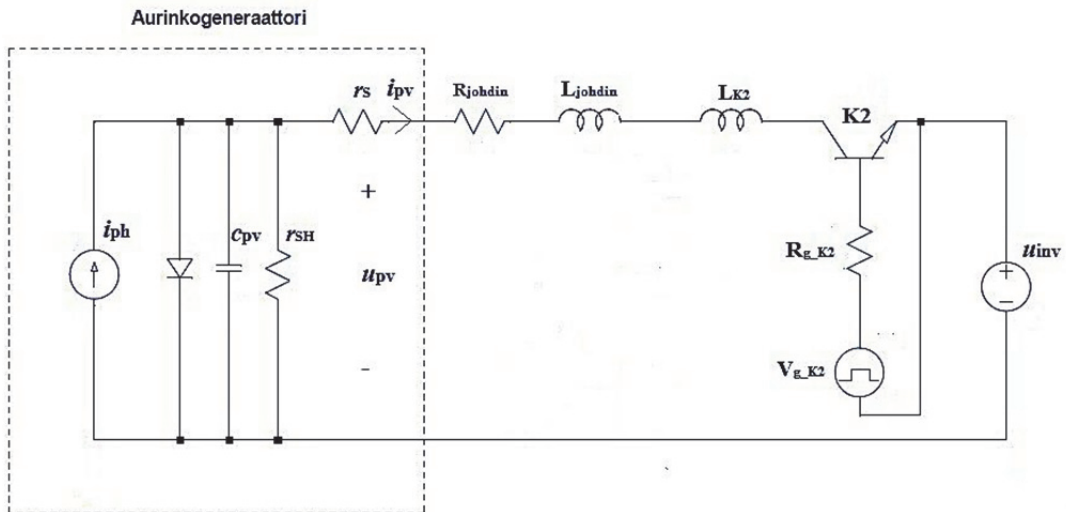
Kuva 4.8. Aurinkogeneraattorin simulointimallin I-V -käyrä simuloitaessa elektronisen sulakkeen toimintaa.

Taulukko 4.3. Simulointipisteet.

u_{pv} [kV]	i_{pv} [A]	p_{pv} [kW]	
0	40	-	oikosulkuvirta
0,2	39,75	7,95	vakiovirta-alue
0,4	39,65	15,86	vakiovirta-alue
0,6	39,55	23,73	vakiovirta-alue
0,8	38,25	30,60	vakiovirta-alue
0,9	26,05	23,44	vakiojännitealue
1,0	0	-	avoimen piirin jännite

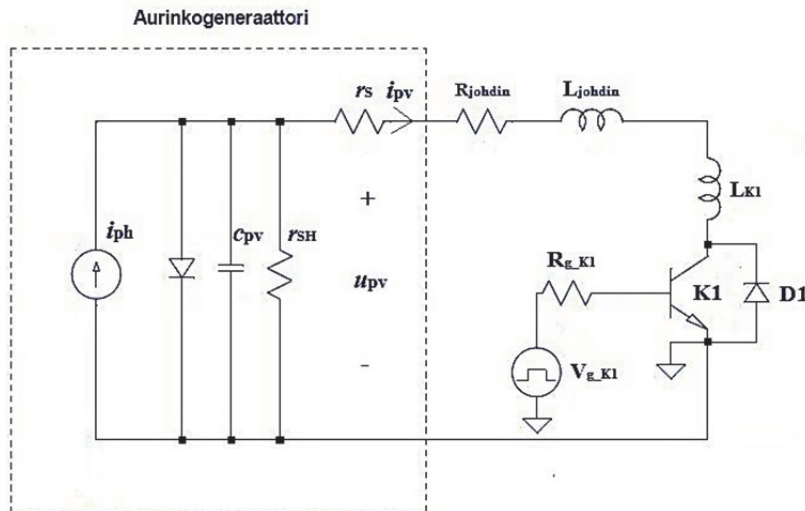
Aurinkogeneraattorilta vaihtosuuntaajalle tulevien johtimien induktanssin arvioitiin olevan $1 \mu\text{H}/\text{cm}$ [30]. Tulojohtimen pituudeksi määriteltiin 10 -100 m, jolloin sen induktanssiksi arvioitiin 10 -100 μH . Kytkimen induktanssiksi asetettiin 200 nH.

Kuten kappaleessa 3.3 todettiin, muodostuu johdotuksen induktanssiin yhtälön (9) mukainen jännite, kun virtapiiri katkaistaan sarjakytkimellä virrallisena. Myös rinnakkaiskytkimen V_{CE} -jännitteessä näkyy sarjakytkimen avaamishetkellä jännitepiikki. Rinnakkaiskytkimen jännitepiikki on sarjakytkimen jännitepiikkiä korkeampi, koska johdotuksen induktanssiin katkaisuhetkellä muodostuva jännite summautuu rinnakkaiskytkimen yli olevaan jännitteeseen. Johdotuksen induktanssin suuruus vaikuttaa siten myös rinnakkaiskytkimen jännitteeseen. Samoin kuin sarjakytkimellä, myös rinnakkaiskytkimellä induktanssin vaikutus on suurempi vakiovirta-alueella, jolloin katkaistava virta on suuri, sillä katkaistavan virran suuruus vaikuttaa johtimen resistanssin yli olevaan jännitteeseen yhtälöiden (13) ja (14) mukaisesti. Samoin katkaistavan virran suuruus vaikuttaa myös molempien kytkimien osalta johtimen ja kytkimen induktanssien yli oleviin jännitteisiin. Lisäksi yhtälöstä (13) nähdään, että sarjakytkimen yli olevaan jännitteeseen vaikuttaa myös järjestelmän toimintapisteen jännite u_{inv} siten, että mitä pienempi toimintapisteen jännite on, sitä suurempi on kytkimen K2 yli oleva jännite. Rinnakkaiskytkimen yli olevaan jännitteeseen toimintapisteen jännite ei puolestaan vaikuta, kuten yhtälöstä (14) nähdään, sillä kytkin K1 suljetaan kun kytkin K2 on avattu, eli aurinkogeneraattorin toimiessa avoimen piirin jännitteellä. Kuvissa 4.9 ja 4.10 on esitetty virtapiirit, kun sarjakytkin avataan ja rinnakkaiskytkin suljetaan.



Kuva 4.9. Sarjakytkimen virtapiiri, kun kytkin avataan.

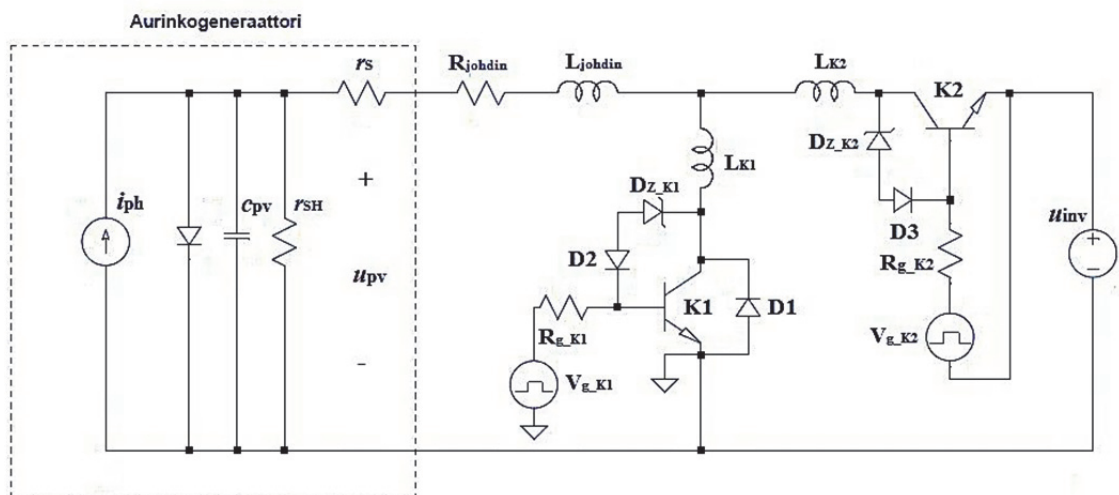
$$u_{K2} = u_{pv} - R_{johdin} \cdot i_{pv} - u_{Ljohdin} - u_{LK2} - u_{inv} \quad (13)$$



Kuva 4.10. Rinnakkaiskytkimen virtapiiri, kun kytkin suljetaan.

$$u_{K1} = u_{pv} - R_{johdin} \cdot i_{pv} - u_{Ljohdin} - u_{LK1} \quad (14)$$

Kuvassa 4.11 on esitetty elektronisen sulakkeen simulointimalli, johon on lisätty active clamping -piirit molemmille kytkimille. Kuvissa 4.7 ja 4.11 olevien piirien avulla tutkitiin kytkennän komponenttien, kuten aurinkogeneraattorin sisäisen kapasitanssin, johdotuksen induktanssin ja kytkinten hilavastusten vaikutusta kytkentäilmiöihin, kuten kytkinten K1 ja K2 V_{CE} -jännitteisiin ja rinnakkaiskytkimen K1 virtapiikkiin, kun kytkin suljetaan.

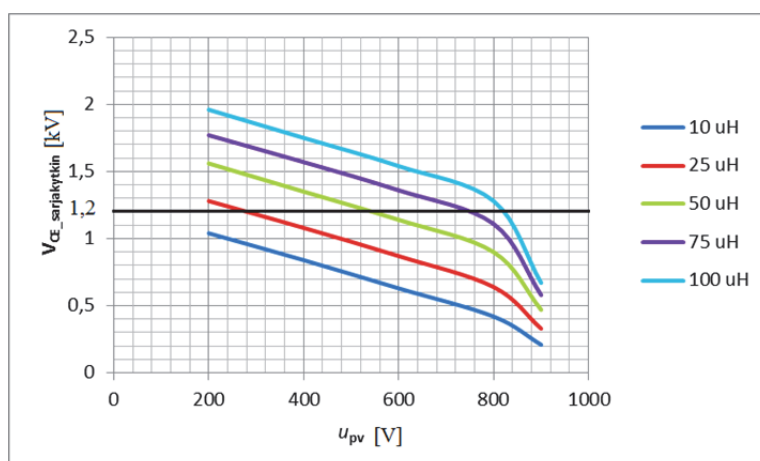


Kuva 4.11. Elektronisen sulakkeen simulointimalli, kun molemmille kytkimille on lisätty active clamping -piirit.

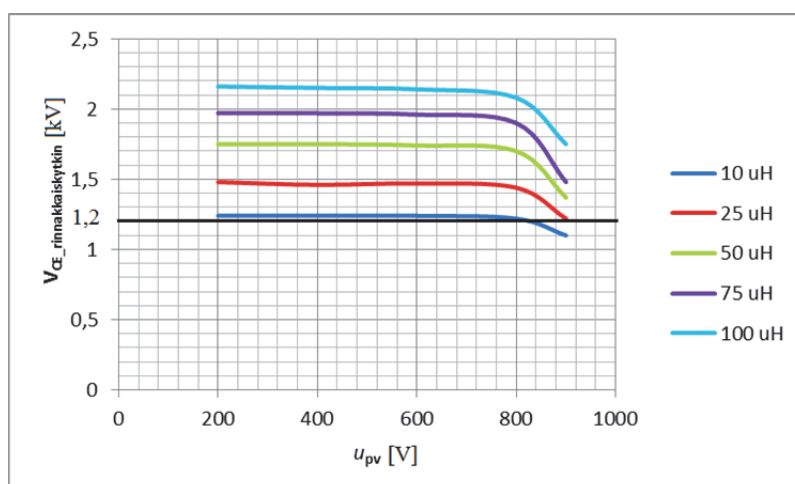
4.5 Simulointituloksia: Elektronisen sulakkeen toiminta

Simuloinnit aloitettiin kuvan 4.7 mukaisella elektronisella sulakepiirillä. Aluksi tarkasteltiin johdotuksen induktanssin vaikutusta sarjakytkimen kytkentähetkellä syntyvään

jännitepiikkiin. Simulointi aloitettiin asettamalla johdotuksen induktanssiksi 10-100 μH . Molempien kytkimien induktanssit olivat 200 nH, ja molempien kytkimien hilavastusten arvot olivat 50 Ω . Simuloinnit suoritettiin taulukossa 4.14 esitetyissä simulointipisteissä. Simuloinneissa aurinkogeneraattorin sisäisen kapasitanssin arvo on 0 F. Kuvassa 4.12 on esitetty rinnakkaiskytkimen ja kuvassa 4.13 sarjakytkimen V_{CE} -jännitepiikkiin suuruus johdotuksen induktanssia vaihdeltaessa. Oletetaan, että kytkennässä käytetään 1200 V:n IGBT-kytkimiä. IGBT:n jännitteenkesto 1,2 kV on merkitty kuviin 4.12 -4.14.



Kuva 4.12. Sarjakytkimen V_{CE} -jännite aurinkogeneraattorin ulostulojännitteen funktiona, kun johdotuksen induktanssin arvo vaihtelee 10 -100 μH :n välillä..



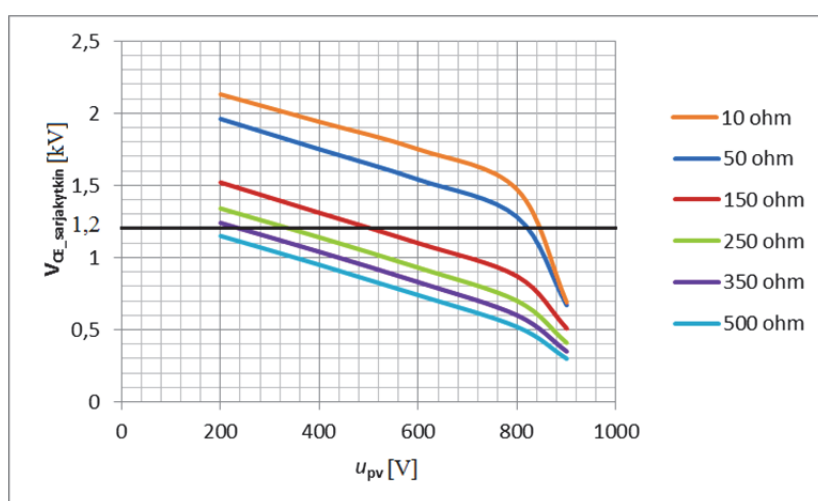
Kuva 4.13. Rinnakkaiskytkimen V_{CE} -jännite aurinkogeneraattorin ulostulojännitteen funktiona, kun johdotuksen induktanssin arvo vaihtelee 10 -100 μH :n välillä.

Kuvan 4.12 tuloksista nähdään, että sarjakytkimen V_{CE} -jännite ylittää IGBT:n jännitteenkeston 1200 V kaikilla muilla johdotuksen induktanssin arvoilla jossain toimintapisteessä, paitsi pienimmällä simuloidulla johdotuksen induktanssin arvolla 10 μH . Lisäksi nähdään, että yhtälön (13) mukaisesti järjestelmän toimintapisteen jännite vaikuttaa sarjakytkimen V_{CE} -jännitepiikkiin siten, että mitä pienempi toimintapisteen jännite on, sitä

suurempi on sarjakytken yli oleva jännite, jolloin myös kytkimen avaamishetkellä muodostuva jännitepiikki riippuu toimintapisteen jännitteestä.

Kuvan 4.13 tuloksista on nähtävissä yhtälön (14) mukaisesti, että järjestelmän toimintapisteen jännite ei puolestaan vaikuta rinnakkaiskytkimen jännitteeseen. Rinnakkaiskytkimen V_{CE} -jännite on kaikissa toimintapisteissä vakiovirta-alueella, jolloin katkaistava virta pysyy lähes vakiona, lähes yhtä suuri. Vakiojännitealueella, jossa katkaistava virta pienenee nopeasti, myös rinnakkaiskytkimen jännitepiikki pienenee. Rinnakkaiskytkimellä johdotuksen induktanssiin kytkimen avaamishetkellä muodostuva jännite summautuu järjestelmän välipiirin jännitteeseen, joka simuloinnissa on 1 kV ja nähdään, että IGBT:n jännitteenkesto ylittyy vakiovirta-alueella kaikissa toimintapisteissä. Vain vakiojännitealueella, eli maksimitehopisteen jännitettä suuremmilla jännitteen arvoilla, jolloin katkaistava virta on pieni, rinnakkaiskytkimen V_{CE} -jännite jää pienimmällä simuloidulla johdotuksen induktanssilla, eli 10 μH :llä alle 1200 voltin. Tulosten perusteella V_{CE} -jännitepiikkiä on pystyttävä rajoittamaan kytkentähetkellä, jotta 1200 voltin jännitekestoisten komponenttien käyttäminen kytkennässä on mahdollista. Koska yhtälön (9) mukaisesti kytkentähetken jännitepiikkiin vaikuttaa kasvattavasti johdotuksen induktanssi, johon ei voida vaikuttaa, on rajoitettava kytkimen kytkentänopeutta. Käytännössä kytkentäpiikin rajoittaminen toteutetaan siis kasvattamalla kytkimen hilavastuksen arvoa tai käyttämällä active clamping -piiriä, jotka hidastavat kytkimen vautumista.

Seuraavaksi simuloitiin kytkimen hilavastuksen vaikutusta sarjakytken avaamishetkellä syntyvään jännitepiikkiin. Kun hilavastusta kasvatetaan, pienenee hilavirta, mikä hidastaa sarjakytken avautumista. Hilavastuksen vaikutusta simuloitiin muuttamalla hilavastuksen arvoa välillä 10- 500 Ω . Kuvassa 4.14 nähdään hilavastuksen vaikutus syntyvään V_{CE} -jännitteeseen, kun sarjakytken avataan.



Kuva 4.14. Sarjakytken V_{CE} -jännite aurinkogeneraattorin ulostulojännitteen funktiona, kun johdotuksen induktanssi on 100 μH ja hilavastuksen arvo vaihtelee välillä 10-500 Ω .

Kuvasta 4.14 nähdään, että vasta käytettäessä 350 -500 Ω :n hilavastusta jännitepiikki jää kaikissa toimintapisteissä alle 1200 voltin. tulosten perusteella voidaan todeta, että hilavastuksen kasvattaminen ei ole yksistään riittävä menetelmä jännitepiikin rajoittamiseen tässä sovelluksessa. Koska, kuten kappaleessa 2.1 todettiin, aurinkogeneraattorin ulostulojännite ja -virta voivat saada vain arvoja vain sen I-V -käyrältä, mikäli aurinkogeneraattorin sisäinen kapasitanssi oletetaan merkityksettömän pieneksi. Rinnakkaiskytkintä suljettaessa liikutaan I-V -käyrällä avoimen piirin jännitteeltä oikosulkuun I-V -käyrää pitkin. Eli mitä hitaammin kytkin suljetaan, sitä hitaammin käyrää pitkin liikutaan ja sitä suuremmaksi muodostuu sähköenergia

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} u_{pv}(t) \cdot i_{pv}(t)dt, \quad (15)$$

jonka on kuluttava puolijohdekytkimessä ennen kuin aurinkogeneraattori on oikosulussa ja sen napojen välinen jännite on 0 V ja kytkimen läpi kulkee generaattorin oikosulkuvirta. Tämä tulee ottaa huomioon mitoitettaessa rinnakkaiskytkintä, jotta kytkimen maksimienergia ei ylitä.

Taulukkoon 4.4 on laskettu virran muutosnopeudet ajan suhteen kaavan (9) mukaisesti simulointipisteessä $u_{pv}=800$ V ja $i_{pv}=38,25$ A, kun sarjakytkin avataan. Johdotuksen induktanssin arvo 100 μ H. Kuten taulukosta nähdään, virran muutosnopeus di/dt pienenee hilavastuksen arvon kasvaessa, eli hilavastuksen arvon kasvattaminen hidastaa kytkimen avautumista. Tämä puolestaan pienentää muodostuvaa jännitepiikkiä.

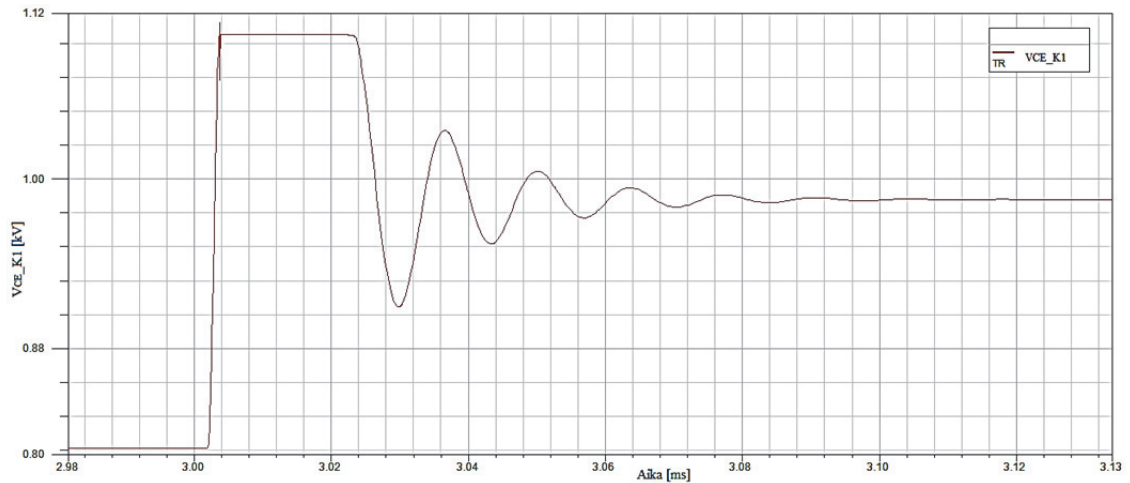
Taulukko 4.4. Hilavastuksen vaikutus sarjakytkimen V_{CE} -jännitteen suuruuteen ja virran muutosnopeuteen kytkentähetkellä simulointipisteessä $u_{pv}=800$ V.

Rg_K2 [Ω]	di/dt [A/ μ s]	V_{CE_K2} [kV]
10	14,7	1,47
50	12,8	1,28
150	8,7	0,87
250	7,0	0,70
350	6,0	0,60
500	5,2	0,52

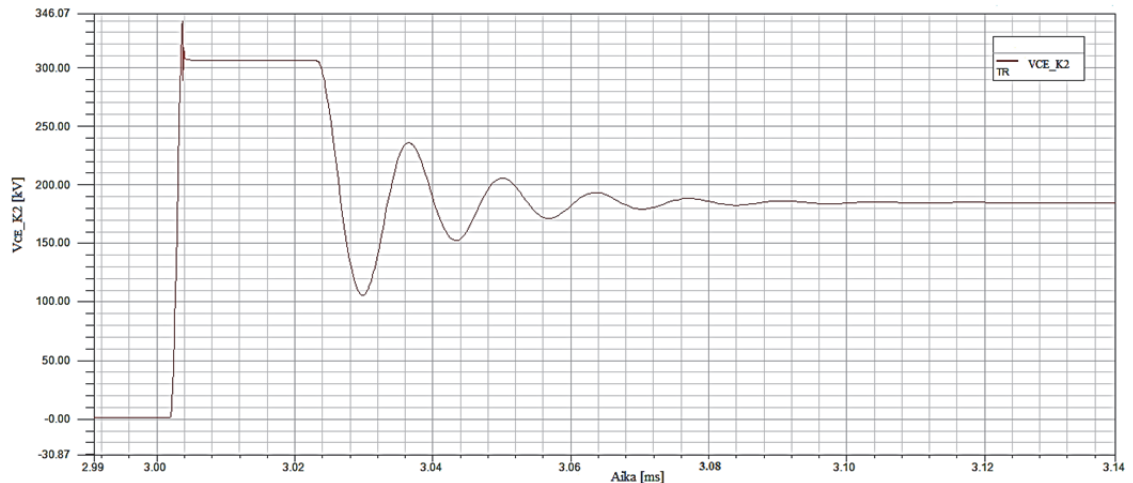
Tämän jälkeen tutkittiin kuvan 4.11 mukaisen kytkennän avulla miten active clamping -piirien käyttäminen vaikuttaa jännitepiikin muodostumiseen sarjakytkimen avaamishetkellä. Oletetaan edelleen, että kytkiminä käytetään 1200 voltin IGBT-kytkimiä, ja active clamping -piiri kummallekin kytkimelle toteutetaan zener-diodilla, jonka zenerjännite on 1100 V. Clamping-jännite valitaan siten, että se on korkeampi kuin järjestelmän maksimi DC-jännite, mutta ei ylitä käytettävän kytkimen jännitteenkestoa. Kuvassa 4.15 nähdään rinnakkaiskytkimen V_{CE} -jännitteen käyrämuoto simulointipisteessä, jossa au-

rinkogeneraattorin ulostulojännite on 800 V ja ulostulovirta 38,25 A. Johdotuksen induktanssin arvo simuloinnissa on 100 μH . Kuvassa 4.16 nähdään puolestaan sarjakytkimen V_{CE} -jännite samalla hetkellä. Nähdään, että käytettäessä clamping-piiriä rinnakkaiskytkimen V_{CE} -jännite rajoittuu zenerjännitteen arvoon. Sarjakytkimen jännitepiikki rajoittuu puolestaan arvoon

$$V_{\text{CE-K2}} = V_Z - u_{\text{inv}}. \quad (16)$$



Kuva 4.15. Zenerdiodilla toteutetun active clamping –piirin vaikutus rinnakkaiskytkimellä muodostuvaan jännitepiikkiin simulointipisteessä $u_{\text{pv}} = 800 \text{ V}$ ja $i_{\text{pv}} = 38,25 \text{ A}$, kun sarjakytkin avataan.

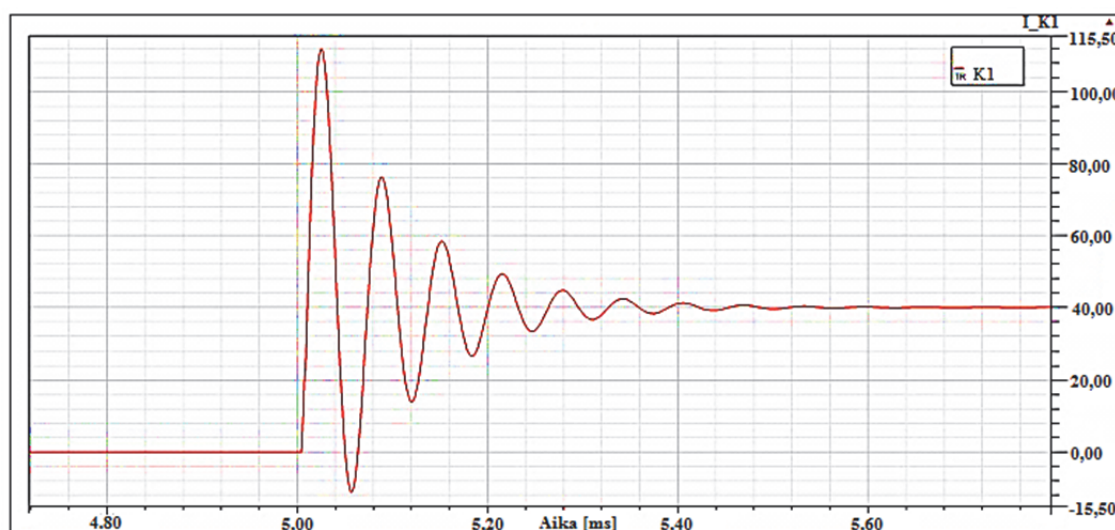


Kuva 4.16. Zenerdiodilla toteutetun active clamping –piirin vaikutus sarjakytkimellä muodostuvaan jännitepiikkiin simulointipisteessä $u_{\text{pv}} = 800 \text{ V}$ ja $i_{\text{pv}} = 38,25 \text{ A}$, kun sarjakytkin avataan.

Lopuksi tarkastellaan aurinkogeneraattorin sisäisen kapasitanssin c_{pv} vaikutusta rinnakkaiskytkimellä muodostuvaan virtapiikkiin. Tarkastellaan 1 μF :n hajakapasitanssin vaikutusta rinnakkaiskytkimen virtaan, kun kytkin suljetaan. Sisäisen kapasitanssin vaiku-

tusta käsitellään artikkelissa [31]. Kapasitanssiarvo $1\ \mu\text{F}$ arvioitiin NAPS NP190GKg -paneelin mittaustulosten perusteella [31]. Artikkelissa [31] ei esitetä mittaustuloksia, mutta artikkelin kirjoittajat Nousiainen ja Puukko toimittivat mittaustuloksia, jotta se oli käytettävissä tässä työssä kapasitanssiarvon arviointiin. Mittaustulokset on liitetty tämän työn loppuun liitteenä (Liite 2).

Kuvasta 4.17 nähdään, että generaattorin sisäinen kapasitanssi c_{pv} vaikuttaa voimakkaasti kytkentähetkellä tapahtuvaan virran soimiseen. Tämä johtuu johdotuksen induktanssin ja aurinkogeneraattorin hajakapasitanssin muodostamasta värähtelypiiristä, eikä siihen voida vaikuttaa komponenttivalinnoilla. Mikäli hajainduktanssin arvo on $0\ \mu\text{H}$, virran soimista ei kytkemishetkellä esiinny, eikä virran arvo ylitä $40\ \text{A}$:ia. Kuvassa 4.17 on esitetty rinnakkaiskytkimen virta, kun sisäisen kapasitanssin arvoksi asetettiin $1\ \mu\text{F}$. Nähdään, että aurinkogeneraattorin sisäinen kapasitanssi, joka on suurimmillaan avoimen piirin jännitteellä vaikuttaa virtapiikin suuruuteen merkittävästi. Tämä on otettava huomioon rinnakkaiskytkimen mitoituksessa sen virrankeston osalta.

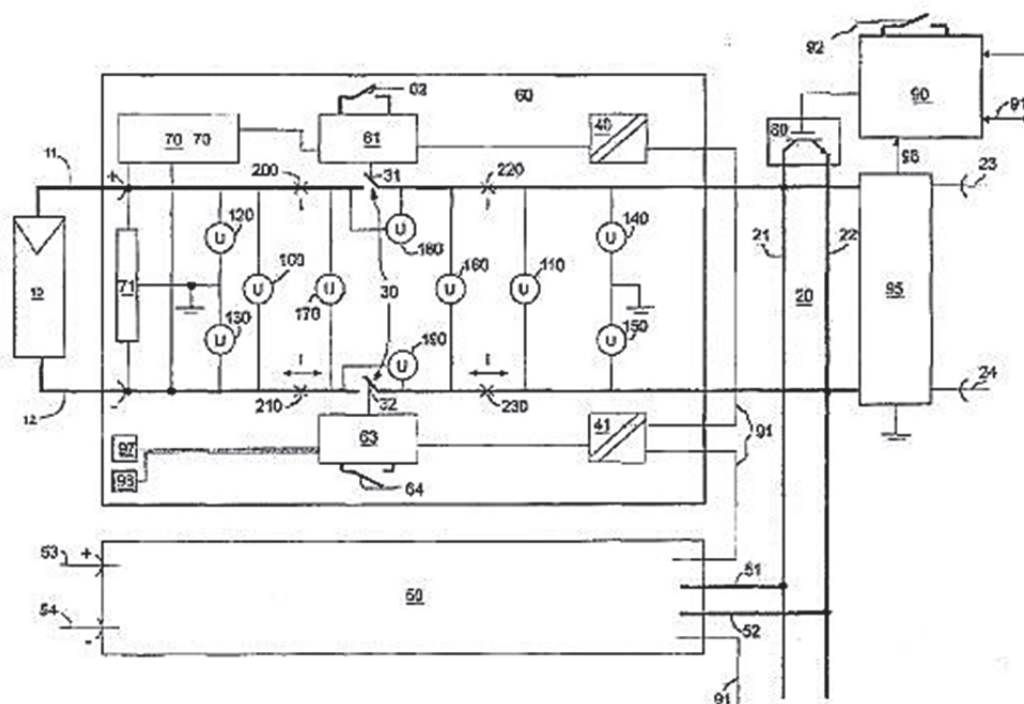


Kuva 4.17. Rinnakkaiskytkimen virta, kun kytkin suljetaan piirissä, jonka johdotuksen induktanssi on $100\ \mu\text{H}$ simulointipisteessä $u_{pv}=1000\ \text{V}$ ja $c_{pv}=1\ \mu\text{F}$.

4.6 Elektroniseen sulakkeeseen liittyviä patentteja

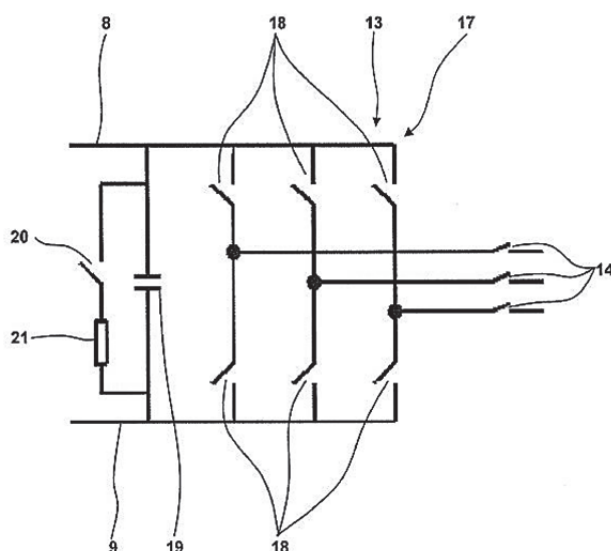
Aurinkosähköjärjestelmissä käytettävästä järjestelmäkohtaisesta elektronisesta sulakkeesta on olemassa ainakin kaksi patentoitua toteutusta. Voltwerk Electronics GmbH on patentoinut ratkaisun (*Switch-Fuse with Control Management for Solar Cells*), jossa DC-syötön katkaisu tapahtuu kahdella sarjakytkimellä, jotka on sijoitettu aurinkogeneraattorin ulostuloon toinen DC+ - ja toinen DC- -johtimeen [32]. DC-johtimien välillä, sekä kummankin DC-johtimen ja maan välillä on useita mittauspisteitä, joiden perusteella piirin jännitteen- ja virran muutoksia seurataan ja sarjakytkimet avataan, mikäli jännitteen tai virran tai molempien mittaustulokset poikkeavat ennalta asetetuista arvoista, joilla syötön tulee katketa [32]. Kuvassa 4.18 on Voltwerk Electronics

GmbH:n patentoima ratkaisu. Patentti koskee sarjakytkimiä (kuvassa 31 ja 32), mittauslaitteita (kuvassa 100 -190 ja 200 -230), sekä sarjakytkimen säätöä (kuvassa 60, 61 ja 63) [32].



Kuva 4.18. Voltwerk Electronics GmbH:n patentoima ratkaisu, missä DC-piirin katkaisu tehdään mekaanisilla kytkimillä [32].

Toinen jo olemassa oleva toteutus elektronisesta sulakkeesta on SMA Solar Technology AG:n patentoima ratkaisu (*Reverse Current Sensor*), jossa takavirran kulkemisen estäminen perustuu järjestelmän toimintapisteen jännitteen alentamiseen paneeliketjukohtaisen virranmittauksen perusteella [33]. Mikäli toimintapisteen jännitteen alentaminen ei riitä takavirran kulkemisen estämiseen, voidaan aurinkogeneraattorin ulostulonavat oikosulkea vaihtosuuntaajaan kytkinsillan kautta [33]. Toteutuksessa on näin ollen samat ominaisuudet kuin tässä työssä esitellyssä ratkaisussa, mutta toteutus on oikosulkupiirin osalta erilainen. Kuvassa 4.19 on SMA Solar technologyn patentoima ratkaisu. Patentti koskee paneeliketjukohtaista virranmittausta (kuvassa 10), virranmittaukselta tulevan signaalin tiedonsiirtoa langattomasti lähettimeltä (kuvassa 22) säätimelle (kuvassa 11), sekä vaihtosuuntaajan kytkinsillalla toteutettavaa oikosulkupiiriä (kuvassa 12) ja kytkimiä, joilla järjestelmä kytketään irti jakeluverkosta (kuvassa 14) [33].



Kuva 4.20. Oikosulkupiirin muodostaminen vaihtosuuntaajan kytkinsillan kautta [33].

Voltwerk Electronics GmbH:n patentoima ratkaisu eroaa tässä työssä esitellystä ratkaisusta siten, että siinä vikavirtojen kulkeminen estetään yksinomaan avaamalla sarjakytkimet ja siten kytkemällä aurinkogeneraattori irti vaihtosuuntaajasta. Solar Technology AG:n patentoima ratkaisu puolestaan sisältää paneeliketjukohtaisen virranmittauksen ja mahdollisuuden muodostaa oikosulkupiirin, mutta ei sisällä mahdollisuutta erottaa vikaantuneen paneeliketjun erottamista muusta järjestelmästä erillisellä sarjakytkimellä.

Näin ollen patentoinnin kannalta voidaan todeta, että tässä työssä esitetty ratkaisu poikkeaa edellä esitetyistä siten, että se sisältää sekä DC-piirin katkaisemisen mahdollistavan sarjakytkimen, että oikosulkupiirin muodostamiseen tarvittavan rinnakkaiskytkimen. Lisäksi oikosulkupiiri muodostetaan tässä työssä esitetyssä ratkaisussa DC-DC -asteen kytkimellä vaihtosuuntaajan kytkinsillan sijasta. Tässä työssä esitetyn ratkaisun patentointimahdollisuus tullaan selvittämään jatkossa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Aurinkosähköjärjestelmässä vikavirtasuojaukseen tarvitaan maavikavirran ja takavirran varalta. Maavikavirta syntyy, kun galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä esiintyy maasulkuvika. Takavirta puolestaan syntyy, kun galvaanisesti erotetussa järjestelmässä maadoitetussa aurinkogeneraattorissa esiintyy yksittäinen tai galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä kaksoismaasulku. Tällöin yksi tai useampi generaattorin paneeliketjuista oikosulkeutuu osittain tai kokonaan. Oikosulussa olevan paneeliketjun avoimen piirin jännite on alempi kuin muiden paneeliketjujen avoimen piirin jännitteet, jolloin kaikkien muiden paneeliketjujen tuottama virta kulkee oikosulun läpi. Takavirta voi toimintapisteestä riippuen nousta niin korkeaksi, että paneelien ja kaapeloinnin virrankestot ylittyvät.

Toistaiseksi vikavirtasuojaus on tyypillisesti toteutettu PV-sulakkeilla ja sarjadiodeilla kytkemällä sulakkeet jokaista paneeliketjua kohti sekä lähtö- että paluujohtimeen ja yksi sarjadiodi myötäsuuntaan jokaista paneeliketjua kohti. Sulakkeilla voidaan suojautua vain niiden virrankeston ylittäviltä virroilta. Koska sulakkeet on käytännössä mitoitetta- va aurinkogeneraattorin oikosulkuvirtaa suuremmille virroille, eivät sulakkeet näin ollen katkaise vikavirtaa matalan säteilyintensiteetin aikana ilmenevän vian aikana, koska toimintavirrat ovat pienempiä. Sulakkeiden ongelmana ovat lisäksi niiden ikääntymisestä johtuvat luotettavuusongelmat.

Sulakkeet ja sarjadiodit voidaan korvata järjestelmäkohtaisella elektronisella sulakepiirillä. Elektroninen sulake koostuu galvaanisesti erottamattomassa järjestelmässä sarjakytkimestä, jolla virtapiiri katkaistaan maavikavirran noustessa liian korkeaksi ja rinnakkaiskytkimestä, jolla takavirran kulkeminen aurinkogeneraattorissa estetään kytkemällä generaattorin ulostulonavat oikosulkuun, mikäli järjestelmässä mitataan ennalta määritellyt rajat ylittävä takavirta. Galvaanisesti erotetussa järjestelmässä maavikavirta ei voi kulkea jakeluverkon kautta, joten elektroninen sulake on mahdollista toteuttaa pelkästään rinnakkaiskytkimellä. Oikosulkupiirin toiminta perustuu siihen, että aurinkogeneraattori on virtalähde, joka voidaan kytkeä oikosulkuun, jolloin sen napojen välissä kulkee vakiovirta, eli aurinkogeneraattorin oikosulkuvirta. Aurinkogeneraattorin ulostulojännite on oikosulussa 0 V, jolloin vikaantuneen paneeliketjun ja aurinkogeneraattorin avoimen piirin jännitteiden välillä ei ole eroa, eikä takavirtaa voi esiintyä.

Elektronisen sulakkeen etuja PV-sulakkeilla ja sarjadiodeilla toteutettuun vikavirtasuojaukseen nähden ovat sen kyky suojata järjestelmää takavirran ohella myös maavikavirralla. Lisäksi järjestelmään integroitu sulake ei edellytä järjestelmän käyttäjältä erillistä mitoitusta, vaan elektronisen sulakkeen mitoitus tapahtuu komponenttitasolla aurinkovaihtosuuntaajan valmistajan taholta.

Katkaistaessa induktiivinen kuorma virrallisena, tulee katkaisuhetkellä muodostuva jännitepiikki rajoittaa siten, että kytkimen jännitteenkesto ei ylitä. Passiivista kondensaattorilla toteutettavaa jänniteclampia ei voida käyttää elektronisen sulakkeen sarjakytkimen jännitepiikin rajoittamiseen kytkimen avaamishetkellä tässä sovelluksessa, koska suuri kapasitanssi piirissä aiheuttaa suuren virtapiikin, kun rinnakkaiskytkin suljetaan. Kytkinten komponenttitason toteutuksessa on huomioitava näiden kytkentäilmiöiden lisäksi sarjakytkimen johtavuustilan häviöt, sillä sarjakytkin on normaalisti johtava. Rinnakkaiskytkimen osalta tulee huomioida sen virrankesto, jotta se kestää rinnakkaiskytkimen sulkemishetkellä muodostuvan virtapiikin.

Mikäli kytkimenä käytetään IGBT:ia, voidaan jännitepiikkiä rajoittaa esimerkiksi zenerdiodilla toteutettavalla active clamping -piirillä. Tällöin kytkimen V_{CE} -jännite kytkentähetkellä rajoittuu zenerdiodin ja siihen summautuneen, zenerdiodin kanssa sarjaan kytketyn diodin myötäsuuntaisen kynnysjännitteen arvoon. Oikosulkupiiriä muodostettaessa puolestaan tulee huomioida virtapiikki, joka muodostuu rinnakkaiskytkimen kytkentähetkellä ja on suoraan verrannollinen piirin jännitteen ja aurinkogeneraattorin sisäisen kapasitanssin arvoon, sekä kääntäen verrannollinen piirin induktanssin arvoon. Virtapiikkiä voidaan rajoittaa hidastamalla kytkimen sulkeutumista kasvattamalla rinnakkaiskytkimen hilavastuksen arvoa. Tämä johtaa kuitenkin kytkimessä lämmöksi kuluvan sähkötehon kasvamiseen kytkintä suljettaessa. Elektroninen sulakepiiri on toteutettavissa aurinkosähköjärjestelmään, jonka maksimi DC-jännite on 1 kV ja oikosulkuvirta 40 A esimerkiksi 1200 voltin IGBT-kytkimillä, joiden kummankin V_{CE} -jännitettä rajoitetaan 1100 voltin zener-clamp -piireillä. Aurinkogeneraattorin sisäinen kapasitanssi vaikuttaa rinnakkaiskytkimen virtaan virtapiikkiä kasvattavasti ja tulee ottaa huomioon kytkimen ja oikosulkupiirin kaapeleiden mitoituksessa virrankeston osalta.

LÄHTEET

- [1] B. Kroposki, R. Margolis, D. Ton, Harnessing the Sun: An Overview on Solar Technologies, Power and Energy Magazine, IEEE, Vol. 7, Issue: 3, s. 22-33.
- [2] J. Gray, Photovoltaics, Science and Engineering, kappale 3: The Physics of the Solar Cell, John Wiley & Sons, 2003.
- [3] A. Mäki ja S. Valkealahti, Power Losses in Long-String and Parallel-Connected Short Strings of Series-Connected Silicon-Based Photovoltaic Modules Due to Partial Shading Conditions, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 27, Issue: 1, s. 173-183, 2011.
- [4] J. Puukko, Issues on Dynamic Modeling and Design of Grid-Connected Three-Phase VSIs in Photovoltaic Applications, Tampereen teknillinen yliopisto, julkaisu no. 1084, 2012.
- [5] L. Nousiainen, Issues on Analysis and Design of Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters, Tampereen teknillinen yliopisto, julkaisu no. 1087, 2012.
- [6] ACN Industry, Saatavilla: <http://www.acn-industry.com> [Haettu 11. 10. 2012].
- [7] Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024810007129> [Haettu: 27.3.2013]
- [8] Vishay General Semiconductor, Solar Cell Bypass Diodes in Silicon Crystalline Photovoltaic Panels, Application Note, Saatavilla: <http://www.vishay.com/docs/89398/solarcell.pdf>, 2011
- [9] Ieee Spectrum, 12/12, Powerful PVs Approach 50 Percent Efficiency, s.12, 2012
- [10] SMA Solar Technology AG, Leading Leakage Currents, Saatavilla: <http://files.sma.de/dl/7418/Ableitstrom-TI-UEN114620.pdf>, [Haettu: 22.8.2012]
- [11] O. Lopez, F. D. Freijedo, A. G. Yepes, P. Fernandez-Comesana, J. Malvar, R. Teodorescu, J. Doval-Gandoy, Eliminating Ground Current in a Transformerless Photovoltaic Application, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, s. 140- 147, 2010

- [12] Young-Hyok Ji, Doo-Yong Jung, Chung-Yuen Won, Byoung-Kuk Lee, Jin-Wook Kim, Maximum Power Point Tracking Method for PV Array under Partially Shaded Condition, Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE 2009, s. 307-312
- [13] Saksan pienjänniteverkkostandardi, VDE-AR-N 4105:2011-08, Power Generation Systems Connected to the Low-Voltage Distribution Network
- [14] T. Suntio, J. Leppäaho, J. Huusari, L. Nousiainen, Issues on Solar-Generator Interfacing with Current-Fed MPP-Tracking Converters, IEEE Transactions on Power Electronics, vol 25, nro. 9, s. 2409- 2419, 2010
- [15] I. Abdalla, L. Zhang, J. Corda, Voltage-Hold Perturbation & Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm (VH-P&O MPPT) for Improved Tracking over the Transient Atmospheric Changes, Power Electronics and Applications (EPE 2011), s. 1-10, 2011
- [16] N. Mohan, T.M. Undeland, W. P. Robbins, Power Electronics, Converters Applications and Design, kappale 28: Gate and Base Drive Circuits, 3. painos, John Wiley & Sons, 2003
- [17] W.-T. Franke, N. Oestereich, F. W. Fuchs, Comparison of Transformerless Converter Topologies for Photovoltaic Application Concerning Efficiency and Mechanical Volume, Industrial Electronics (ISIE), s. 724 – 729, 2010
- [18] R. Anil Kumar, M. S. Suresh, J. Nagaraju, Effect of Solar Array Capacitance on the Performance of Switching Shunt Voltage Regulator, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 2, s. 543- 548, 2006
- [19] P. Kremer, Arcing Potential in Fuses: Missing Standards for Adequate Testing of Fuses in PV Application, saatavilla:
http://www.solarabcs.org/about/publications/meeting_presentations_minutes/2011/02/pdfp/Kremer-Arc_Potential_in_fuses.pdf, [Haettu: 21.9.2012]
- [20] Y. Zhao, R. Lyons Jr., Ground-Fault Analysis and Protection in PV Arrays, Photovoltaic Protection, Note 1, Issue 1, Saatavilla:
<http://epus.mersen.com/resources/media/articles/TT-PVPN1-Ground%20Fault%20Analysis.pdf>, [Haettu: 21.9.2012]
- [21] Y. Zhao, B. Lehman, J-F de Palma, J. Mosesian, R. Lyons, Fault Analysis in Solar PV Arrays under: Low Irradiance Conditions and Reverse Connections, Northeastern University, Boston, MA, US, MERSEN USA Newburyport-MA, LLC, Newburyport, MA, US, s. 2000- 2005, 2011

- [22] P. Spertino, Are Manufacturing I-V Mismatch and Reverse Currents Factors in large Photovoltaic Arrays?, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, s. 4520- 4531, 2009
- [23] PV module safety qualification according to IEC 61730:2004 EN 61730:2007, Version 2009-01-22, TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH, Renewable Energies, Saatavilla: http://www.solar-academy.com/menus/IEC_61730022701.pdf, 2009
- [24] W. Herrmann, N. Bogdanski, Outdoor Weathering of PV Modules- Effects of various Climates, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE, TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, Cologne, s. 2305- 2311, 2011
- [25] N. Henze, P. Funtan, Fehlerströme und Schutztechniken in Photovoltaikanlagen, Theoretische Betrachtungen zum Einsatz von Sicherungen in Photovoltaikanlagen, Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology IWES, 3. Sicherungstag, 04.-05.05.2010, Würzburg, 2010
- [26] NAPS Systems Oy, Saatavilla: <http://www.napssystems.com/images/stories/PDF/modulesweb/Naps%20Pallas%20SAW%20Data%20Sheet.pdf>. [Haettu 22. 8. 2012].
- [27] Photovoltaic System Overcurrent Protection, Cooper Bussmann, Saatavilla: <http://www1.cooperbussmann.com/pdf/9df1f7ec-8c62-4210-8cf8-9504927394f0.pdf>, [Haettu: 26.9.2012]
- [28] ABB Oy, Solar Energy, Protecting and isolating PV Systems, Saatavilla: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/40abe76927e9e01dc12576ba003c22bf/\\$file/solar%20cat%20lr%20v.06.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/40abe76927e9e01dc12576ba003c22bf/$file/solar%20cat%20lr%20v.06.pdf), [Haettu: 21.8.2012]
- [29] H. Rüedi, P. Köhli, Treiberlösungen für Hochspannungs-IGBTs, CT-Concept Technologie AG, VDE-VTF Fachtagung Bad Nauheim, 23.-24. 4. 2002
- [30] Mark Thompson, Tricks of the Trade: Guesstimating the Inductance of Wire Loops, Intelec 99, 21. International Telecommunication Energy Conference, Kööpenhamina, 6.-9. 6. 1999 Saatavilla: http://www.thompsonrd.com/Guesstimating_Inductance.pdf, [Haettu: 18.1.2013]
- [31] Nousiainen et al., Photovoltaic Generator as an Input Source, Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International, s. LS1d.2-1 - LS1d.2-8, IEEE TPEL 2012

- [32] A. Richter, S. Leu, Voltwerk Electronics GmbH, Switch-Fuse with control management for solar cells, European Patent Application, EP 2 369 709 A2, 28.9.2011
- [33] G. Hackenberg, SMA Solar Technoly AG, Reverse Current Sensor, U.S. Patent Application, US 2012/0139347 A1, 7.6.2012

LIITTEET

Liite 1. Aurinkogeneraattorin simulointimalli, m-file

Liite 2. NAPS NP190GKg-aurinkopaneelin sisäisen kapasitanssin mittaustuloksia

Liite 1. Aurinkogeneraattorin simulointimalli, m-file

```

clear all
close all
clc

% Ympäristön parametrit
Gakt = 1000;          % Auringon säteilyintensiteetti (W/m^2)
Gakt1 = 1000;
Gakt2 = 1000;
Gakt3 = 1000;
Gakt4 = -8;
Tamb = -8;           % Ympäristön lämpötila celsius-asteina
Tamb1 = -8;
Tamb2 = -8;
Tamb3 = -8;
Tamb4 = -8;

% Aurinkopaneelin parametrit
Uoc = 33.1;          % Avoimen piirin jännite STC-olosuhteissa
Isc = 8.02;          % Oikosulkuvirta STC-olosuhteissa
Pmpp = 190;          % Maksimiteho STC-olosuhteissa
Ump = 25.9;          % Maksimitehopisteen jännite STC-olosuhteissa
Imp = 7.33;          % Maksimitehopisteen virta STC-olosuhteissa

Rs = 0.33;           % Sarjaresistanssi (ohm)
Rsh = 188;           % Rinnakkaisresistanssi (ohm)
A = 1.3;             % Diodin ideaalisuuskerroin
Ku = -0.124;         % Avoimen piirin jännitteen lämpötilakerroin
Ki = 0.005;          % Oikosulkuvirran lämpötilakerroin
Kt = 0.033;          % Lämpötilan nousukerroin
Ns = 54;             % Sarjaan kytkettyjen kennojen määrä paneelissa

% Vakiot
Gstc = 1000;          % Auringon säteilyintensiteetti STC-olosuhteissa (W/m^2)
Tstc = 25;           % Ympäristön lämpötila STC-olosuhteissa celsius-asteina
k = 1.3806488e-23;    % Boltzmannin vakio
q = 1.602176565e-19; % Elektronin varaus

% Laskenta
% Paneelin lämpötila
Tmodule1 = Tamb1 + Kt*Gakt1;
Tmodule2 = Tamb2 + Kt*Gakt2;
Tmodule3 = Tamb3 + Kt*Gakt3;
Tmodule4 = Tamb4 + Kt*Gakt4;
dT1 = Tmodule1 - Tstc;

```

```

dT2 = Tmodule2 - Tstc;
dT3 = Tmodule3 - Tstc;
dT4 = Tmodule4 - Tstc;

% Aurinkokennon terminen jännite:
Ut1 = Ns * k * (Tmodule1 + 273.15) / q;
Ut2 = Ns * k * (Tmodule2 + 273.15) / q;
Ut3 = Ns * k * (Tmodule3 + 273.15) / q;
Ut4 = Ns * k * (Tmodule4 + 273.15) / q;

% Valosähköisen ilmiön tuottama virta:
Iph1 = (Isc + Ki*dT1) * Gakt1 / Gstc * (Rsh + Rs) / Rsh;
Iph2 = (Isc + Ki*dT2) * Gakt2 / Gstc * (Rsh + Rs) / Rsh;
Iph3 = (Isc + Ki*dT3) * Gakt3 / Gstc * (Rsh + Rs) / Rsh;
Iph4 = (Isc + Ki*dT4) * Gakt4 / Gstc * (Rsh + Rs) / Rsh;

% Vuotovirta i0:
Io1 = (Iph1 - (Uoc + Ku*dT1)/Rsh) / (exp((Uoc + Ku*dT1)/(A*Ut1)) - 1);
Io2 = (Iph2 - (Uoc + Ku*dT2)/Rsh) / (exp((Uoc + Ku*dT2)/(A*Ut2)) - 1);
Io3 = (Iph3 - (Uoc + Ku*dT3)/Rsh) / (exp((Uoc + Ku*dT3)/(A*Ut3)) - 1);
Io4 = (Iph4 - (Uoc + Ku*dT4)/Rsh) / (exp((Uoc + Ku*dT4)/(A*Ut4)) - 1);

% Iterointi sekanttimenetelmällä

Upv = [0:0.01:1.5*Uoc];
Ipv = zeros(size(Upv));

tolerance = 1e-4;
maxiterations = 100;

for i = 1:size(Upv,2) % Iterointi, paneeliketju 1
    f = @(x)(Iph1 - Io1 * (exp((Upv(i) + Rs*x)/(A*Ut1)) - 1) - (Upv(i) + Rs*x)/Rsh - x);
    x(1) = Isc*Gakt1/Gstc;
    x(2) = 0;
    for h = 3:maxiterations
        x(h) = x(h-1) - (f(x(h-1)))*(x(h-1) - x(h-2))/(f(x(h-1)) - f(x(h-2)));
        if abs(x(h)-x(h-1)) <= tolerance
            break
        end
    end
    Ipv1(i) = x(h);
end

for i = 1:size(Upv,2) % Iterointi, paneeliketju 2
    f = @(x)(Iph2 - Io2 * (exp((Upv(i) + Rs*x)/(A*Ut2)) - 1) - (Upv(i) + Rs*x)/Rsh - x);
    x(1) = Isc*Gakt2/Gstc;
    x(2) = 0;
    for h = 3:maxiterations
        x(h) = x(h-1) - (f(x(h-1)))*(x(h-1) - x(h-2))/(f(x(h-1)) - f(x(h-2)));

```

```

        if abs(x(h)-x(h-1)) <= tolerance
            break
        end
    end
    Ipv2(i) = x(h);
end

for i = 1:size(Upv,2) % Iterointi, paneeliketju 3
    f = @(x)(Iph3 - Io3 * (exp((Upv(i) + Rs*x)/(A*Ut3)) - 1) - (Upv(i) + Rs*x)/Rsh - x);
    x(1) = Isc*Gakt3/Gstc;
    x(2) = 0;
    for h = 3:maxiterations
        x(h) = x(h-1) - (f(x(h-1)))*((x(h-1) - x(h-2))/(f(x(h-1)) - f(x(h-2))));
        if abs(x(h)-x(h-1)) <= tolerance
            break
        end
    end
    Ipv3(i) = x(h);
end

for i = 1:size(Upv,2) % Iterointi, paneeliketju 4
    f = @(x)(Iph4 - Io4 * (exp((Upv(i) + Rs*x)/(A*Ut4)) - 1) - (Upv(i) + Rs*x)/Rsh - x);
    x(1) = Isc*Gakt4/Gstc;
    x(2) = 0;
    for h = 3:maxiterations
        x(h) = x(h-1) - (f(x(h-1)))*((x(h-1) - x(h-2))/(f(x(h-1)) - f(x(h-2))));
        if abs(x(h)-x(h-1)) <= tolerance
            break
        end
    end
    Ipv4(i) = x(h);
end

Upv_generator = 26*Upv; % 26 paneelia / paneeliketju
Uoc_generator = 26*Uoc; % Aurinkogeneraattorin avoimen piirin jännite
Ipv_generator = Ipv1+Ipv2+Ipv3+Ipv4; % Aurinkogeneraattorin ulostulovirta
Isc_generator = 4* Isc; % Aurinkogeneraattorin oikosulkuvirta
Ppv = Ipv_generator.*Upv_generator; % Aurinkogeneraattorin ulostuloteho

```

Liite 2. NAPS NP190GKg-aurinkopaneelin sisäisen kapasitanssin mittaustuloksia

Voltage (V)	Current (A)	NAPS NP190GKg			
		Power (W)	rpv (dBΩ)	Cpv (μF)	Cpv (dBμF)
28,437	0,021	0,597	-1,550	19,76	25,91
27,997	0,552	15,454	-1,007	19,10	25,62
26,997	1,640	44,275	0,561	17,08	24,65
26,000	2,522	65,572	2,787	13,76	22,77
24,951	3,229	80,567	5,913	9,97	19,98
23,982	3,801	91,156	10,138	6,20	15,85
23,002	4,030	92,698	15,958	3,34	10,48
22,005	4,086	89,912	37,968	2,39	7,55
21,027	4,093	86,064	38,606	2,07	6,33
19,950	4,106	81,915	43,232	1,84	5,31
18,996	4,114	78,150	44,801	1,65	4,32
17,990	4,120	74,119	46,974	1,48	3,40
17,010	4,128	70,217	47,019	1,35	2,61
16,010	4,134	66,185	46,812	1,26	1,99
15,000	4,144	62,160	46,542	1,15	1,20
14,003	4,151	58,126	46,353	1,06	0,49
13,000	4,159	54,067	46,132	0,99	-0,11
12,000	4,166	49,992	46,539	0,92	-0,70
11,000	4,172	45,892	48,332	0,87	-1,16
10,020	4,176	41,844	48,953	0,82	-1,69
9,030	4,179	37,736	49,888	0,78	-2,13
8,016	4,182	33,523	50,131	0,77	-2,23
6,996	4,184	29,271	48,383	0,82	-1,75
5,994	4,191	25,121	50,278	0,87	-1,24
5,007	4,197	21,014	51,372	0,92	-0,76
4,002	4,204	16,824	50,751	0,94	-0,50
3,003	4,210	12,643	49,000	0,94	-0,51
2,004	4,215	8,447	43,024	0,99	-0,04
1,008	4,229	4,263	40,068	1,14	1,13